



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

VÝPOČETNÍ MODELOVÁNÍ SVAROVÝCH SPOJŮ

COMPUTATIONAL MODELLING OF WELDED JOINTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Schiffer

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jozef Dlugoš, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Adam Schiffer**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jozef Dlugoš, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výpočetní modelování svarových spojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Svarový spoj je komplexní konstrukční uzel, který není vždy dostatečně popsitelný analytickými metodami. Proto existují pokročilé metody založené např. na metodě konečných prvků, které jsou specializované právě na problematiku svarových spojů a dokáží simulovat výrobní procesy jako i zátěžové stavy. Tato závěrečná práce nabízí přehled výše popsaných výpočetních nástrojů a jejich vlastností.

Cíle bakalářské práce:

Základní popis svarových spojů a problémů, ke kterým při sváření dochází
Přehled a popis výpočetních nástrojů zaměřených na problematiku svarových spojů

Seznam doporučené literatury:

ČSN 05 0000. Sváření. Sváření kovů. Základní pojmy. 1988.

SIMUFACT [online]. Dostupné z: www.simufact.com.

ANSYS [online]. Dostupné z: www.ansys.com.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Svařované spojení je v dnešní době velmi rozšířenou metodou spojování materiálů. Svarové spoje se vyrábí velmi komplexními technologickými procesy, a proto je nezbytné posouzení jejich chování. V současné době bylo vyvinuto velké množství MKP softwarů, nabízejících větší efektivitu při návrhu svarových spojů. Tato práce obsahuje souhrn vybraných softwarů a jejich metodik při výpočetním modelování svarových spojů. Kromě popisu jednotlivých softwarů obsahuje také jejich porovnání na základě stanovených kritérií. Jako hlavní kritérium byla zvolena možnost zahrnutí fázových přeměn při analýze procesu svařování. Byl proveden také průzkum dostupnosti studentských licencí.

KLÍČOVÁ SLOVA

svarový spoj, metoda konečných prvků, metoda Hot-Spot, metoda efektivního vrubového napětí

ABSTRACT

Welded joint is nowadays a very widespread method of joining materials. Welded joints are produced by very complex technological processes, and therefore it is necessary to assess their behavior. Currently, a large number of FEM software products has been developed, offering better efficiency in the design of welded joints. This work contains a summary of selected software and their methodologies in computational modelling of welded joints. In addition to the description of individual software, it also contains their comparison on the basis of set criteria. The possibility of including phase transformations in the analysis of the welding process was chosen as the main criterion. A survey of the availability of student licenses was also carried out.

KEYWORDS

welded joint, finite element method, Hot-Spot method, effective notch stress method

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SCHIFFER, A. Výpočetní modelování svarových spojů. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Jozef Dlugoš.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jozefa Dluhoše, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 21. května 2021

.....

Adam Schiffer

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jozefu Dlugošovi, Ph.D. za ochotu, rady a podporu během psaní této práce. Poděkování také patří Ing. Mojmíru Vaňkovi, Ph.D. za doporučení publikací. Také bych chtěl poděkovat rodičům a své přítelkyni Aničce za jejich podporu při studiu.

OBSAH

Úvod	9
1 Úvod do problematiky svarových spojů	10
1.1 Nutné předpoklady základních a přídavných materiálů	10
1.2 Metody svařování	10
1.3 Tepelně ovlivněná oblast materiálu	11
1.4 Koncentrátory napětí svarových spojů	11
1.5 Zbytková napětí	12
2 Doporučené metody výpočtů svarových spojů	13
2.1 Charakter namáhání svarových spojů	13
2.2 Únavové chování svarových spojů	13
3 Metoda konečných prvků	17
3.1 Výpočetní modelování pomocí MKP	17
3.2 Využití MKP při řešení svarových spojů	17
3.3 Software pro řešení svarových spojů pomocí MKP	18
4 ANSYS	20
4.1 Společnost Ansys, Inc.	20
4.2 Ansys Workbench™	20
4.3 Svarové spoje řešené v Ansys Workbench	20
4.4 Ansys ACT (Application Customization Toolkit)	20
5 SIMUFACT	35
5.1 O společnosti	35
5.2 Simufact Welding	35
6 ABAQUS	43
6.1 Dassault Systèmes	43
6.2 Software Abaqus	43
6.3 Abaqus Welding Interface (AWI)	43
6.4 QustomWeld	46
7 SYSWELD	49
7.1 ESI Group	49
7.2 Program SYSWELD	49
8 Srovnání jednotlivých softwarů pro modelování svarových spojů	52
Závěr	53
Použité informační zdroje	54
Seznam použitých zkratk a symbolů	56

ÚVOD

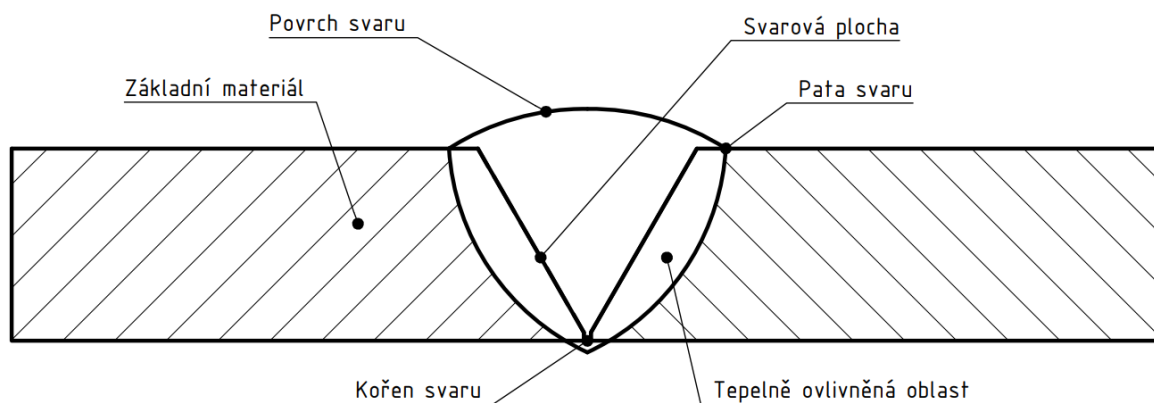
Svarový spoj je jeden z nejčastěji užívaných typů spojení dvou a více materiálů v jeden celek. Jedná se o nerozebíratelné spojení vzniklé za zvýšených teplot a případně i za zvýšeného tlaku. Z ekonomických důvodů je svařování stále častěji užíváno, především kvůli jeho snadné automatizaci a dlouhé životnosti spojů. Při jejich výrobě je možné se setkat s různorodými případy chování, které svarové spoje obnáší. Mezi takové případy lze zařadit například vznik nehomogenní struktury materiálu v blízkosti svaru, která má za následek růst napětí ve svařenci. Při zkoumání svarových spojů bývají podstatné vlastnosti, mezi které patří zbytková napětí, únavové trhliny a různé povrchové vady. Je tedy nutné brát vždy v potaz použité materiály, geometrii daného spoje, teplotu svařování a mnohé další faktory [1].

Pro navrhnutí svařence a odhad jeho životnosti lze použít různých metod. Analytická řešení jsou vhodná pro výpočet elementárních těles, kdy výpočet dané problematiky ulehčí. Navíc po výpočtu lze snadno zjistit vliv zatížení v jakémkoli bodě tělesa. Analytickými normovanými výpočty je možné řešit i složitější konstrukce při nahrazení jednotlivých součástí elementárními tělesy. Poté bývá výsledek pouze orientační. Naproti tomu užití numerických metod (metody konečných prvků (MKP)) je vhodné pro řešení těles složitějších. Jsou však omezeny množstvím výpočtových uzlů na řešené oblasti, se kterými roste i doba výpočtu. V případě geometricky složitějších svarových spojů je však výpočet pomocí MKP efektivní volbou. Pro výpočetní modelování je vhodné použít výkonný hardware a kvalitní řešič (software), který urychlí průběh výpočtu dané problematiky. Tato práce se zabývá konkrétními příklady softwarů na bázi MKP, které se v praxi pro řešení svarových spojů aktivně užívají.

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY SVAROVÝCH SPOJŮ

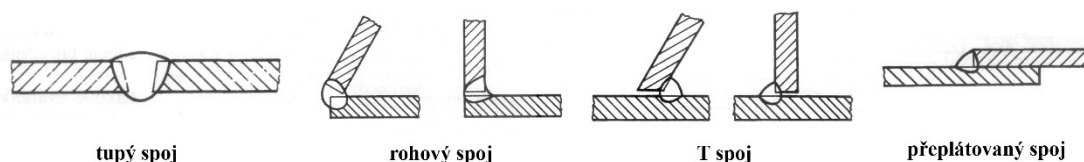
1.1 NUTNÉ PŘEDPOKLADY ZÁKLADNÍCH A PŘÍDAVNÝCH MATERIÁLŮ

Strojní ocelové konstrukce by měly při hodnocení danou normou splňovat její požadavky na materiál, geometrii apod. Podstatné jsou tedy mechanické parametry, chemická složení materiálů a tvary a rozměry jejich polotovarů. Normou ČSN 05 0120 jsou doporučeny polotovary typu trubek, tyčí, ploch a různých tenkostěnných profilů z oceli ke tváření (11 353, 11 373, 11 423). Tato norma dále navrhuje také oceli na odlitky (42 2630, 42 2713) nebo na výkovky (11 368, 11 353), u kterých se předpokládá následné sváření. Případné další vlastnosti musí být předepsány ve výkresové dokumentaci. Použité materiály musí mít zaručenou nebo zaručenou podmíněnou svařitelnost. V závislosti na aplikované metodě svařování a její maximální teplotě se přídatné materiály mohou lišit. Pro dosažení požadované kvality spoje je dobré, když přídatný materiál má podobné vlastnosti jako materiál základní [1], [2]. Na obr. 1 jsou zobrazeny základní části svarového spoje.



Obr. 1 Schéma svarového spoje. Převzato a upraveno podle [1].

Podle vzájemné polohy základních materiálů a přídatného materiálu rozlišujeme svarové spoje dle obr. 2.



Obr. 2 Typy svarových spojů. Převzato a upraveno podle [1].

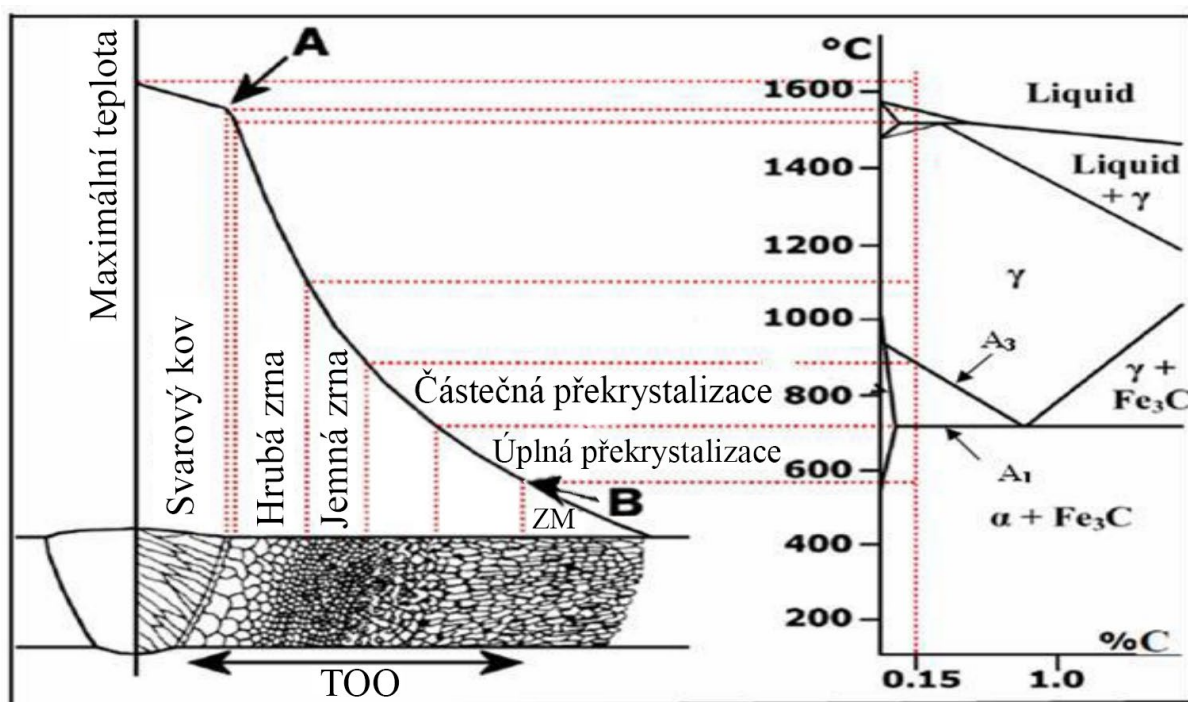
1.2 METODY SVAŘOVÁNÍ

Podle základního dělení rozlišujeme svařování tavné a svařování s použitím tlaku. Svařování se dá také rozlišit podle stupně automatizace od ručního až po plně automatizované. Metoda svařování ovlivňuje použitou teplotou a způsobem spojení materiálů tvar svarové plochy.

Těmito aspekty a také mírou přesnosti může svařování ovlivnit výsledný charakter namáhání [1].

1.3 TEPELNĚ OVLIVNĚNÁ OBLAST MATERIÁLU

Při procesu svařování hrají velkou roli zvolené materiály s různými fyzikálními a chemickými vlastnostmi, včetně bodu teploty tání, hodnotami tepelné vodivosti a roztažnosti. Z hlediska mikrostruktury materiálu je svařenec významně ovlivněn transformací austenitu do nových struktur při ochlazování. Pokud je svařenec ochlazován rychlostí vyšší než kritickou, doprovází tento proces martenzitická transformace, která často zapříčiňuje selhání svaru praskáním. Napříč svařencem se mohou vyskytovat velké odchylky v tvrdosti kvůli fázovým přeměnám a mísením více materiálů. Tepelně ovlivněná oblast (TOO), v anglické literatuře nazývaná „heat affected zone“ (HAZ), je výrazně ovlivněna maximální teplotou svarové lázně, teplotou okolí, geometrií konstrukce a také rychlostí svařování. TOO se nachází mezi svarem a základním materiálem. Vzniklá mikrostruktura v TOO je závislá na údajích z IRA a ARA diagramů [3]. Na obr. 3 je zobrazen přechod mikrostruktury nízkolegované oceli v TOO v závislosti na vzdálenosti od svaru. V bodě A je rozhraní svarového kovu a TOO, která navazuje na základní materiál v bodě B [4].



Obr. 3 Diagram tepelně ovlivněné oblasti nízkolegované oceli. Převzato a upraveno podle [4].

1.4 KONCENTRÁTORY NAPĚTÍ SVAROVÝCH SPOJŮ

Velmi podstatný koncentrátor napětí bývá v patě svaru kvůli vysokému napěťovému gradientu. Další případné koncentrace napětí v součástech bývají způsobeny [5], [6]:

- Nebezpečnými místy konstrukcí, př. ostré hrany
- Geometrií svaru
- Nedokonalostmi svaru v souladu s běžnými výrobními procesy (způsob upnutí součástí při svařování, praskliny)

- Povrchem svarové plochy (rovinná, vypuklá, vydutá) a plochami konstrukce, př. koroze
- Následnými úpravami (žihání, broušení apod.)

1.5 ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ

Obecně se zbytková napětí ve svařovaných součástech nacházejí z důvodu lokálních plastických deformací, způsobených tepelným a mechanickým zpracováním při výrobě, při kterém se teplota v součásti rozkládá nerovnoměrně. Jejich přítomnost může výrazně ovlivnit únavové chování při cyklickém zatížení. Účinek zbytkového napětí může být pro součást různý v závislosti na jeho směru. Zbytková napětí v tahu jsou pro danou součást škodlivá a často mohou dosahovat i velikosti meze kluzu materiálu. Jejich působení snižuje únavovou životnost konstrukce zrychlením růstu únavové trhliny. Zatímco při tlakovém působení se rychlost šíření únavové trhliny snižuje [7].

Podle [8] odhalily výsledky některých simulací v programu ABAQUS, že se výsledná zbytková napětí a deformace způsobené svařováním nízkouhlíkových ocelí nezdají být ovlivněny fázovou transformací v pevné fázi. U některých typů ocelí (středně uhlíková apod.) však dochází k výraznému ovlivnění zbytkových napětí a deformací přeměnou z austenitické struktury na martenzitickou. Nehomogenní materiál, s rozdílnými koeficienty tepelné roztažnosti a různými velikostmi meze kluzu, způsobuje v součásti pnutí [8].

2 DOPORUČENÉ METODY VÝPOČTŮ SVAROVÝCH SPOJŮ

Tato kapitola byla inspirována z velké části [5], [9]

2.1 CHARAKTER NAMÁHÁNÍ SVAROVÝCH SPOJŮ

Dle normy ČSN 05 0120 se svarové spoje dají rozdělit do dvou skupin podle charakteru namáhání. Statické zatížení předpokládáme u svarových spojů, u nichž je životnost limitována počtem zátěžných cyklů $N = 5 \cdot 10^3$. Dynamické zatížení potom předpokládáme pro počet cyklů $N > 5 \cdot 10^3$. Mezi $N = 5 \cdot 10^3$ a $N = 2 \cdot 10^6$ nastává časová únava. K únavovému namáhání dochází při $N > 2 \cdot 10^6$. Podle daného případu je nutno počítat se stálým nebo proměnným zatížením. V závislosti na externích vlivech je vyžadován různý přístup při návrhu konstrukce pro docílení požadované životnosti [2], [5].

2.2 ÚNAVOVÉ CHOVÁNÍ SVAROVÝCH SPOJŮ

Posouzení únavy součásti je obvykle založeno na rozsahu napětí nebo na faktoru intenzity napětí. Proto je třeba vyjádřit únavové zatížení, z toho se zjistí minimální a maximální hodnoty napětí. Při tom se zohledňuje kumulativní účinek namáhání:

- Kolísání velikostí zatížení
- Pohyb zatížení po svařenci
- Změny směru zatížení
- Vibrační odezvy materiálu na cyklické zatížení
- Teplotní přechody

Výpočet rozsahu napětí a faktoru intenzity napětí [5]:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (1)$$

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (2)$$

Kde $\Delta\sigma$ je rozsah napětí při únavovém zatížení a σ_{max} a σ_{min} jsou maximální a minimální hodnoty napětí v průběhu tohoto zatěžování. ΔK vyjadřuje rozsah faktoru intenzity napětí při únavovém zatížení a K_{max} a K_{min} jsou maximální a minimální hodnoty intenzity napětí v průběhu tohoto zatěžování.

Únavová životnost bývá obvykle vyjádřena z testů za konstantní nebo proměnné amplitudy zatížení. Pro výpočty svarových spojů existují standardy hodnocení dané normami (ČSN 05 0120, Eurokód 3 – ČSN EN 1993-1-8, ČSN EN 1993-1-9 apod.) a doporučené metody (IIW, DNV, FKM, DVS apod.).

Osvědčenými metodami řešení svarových spojů, při daných specifických podmínkách (omezení mezi kluzu konstrukční oceli, nezahrnutí vlivů koroze atd.), namáhaných cyklicky se zabývá např. IIW (International institute of welding). V rámci doporučení IIW existují takzvané FAT křivky, udávající životnost součástí po dobu $2 \cdot 10^6$ cyklů při dané amplitudě napětí. Tyto křivky vycházejí z experimentálních měření svarových spojů zatěžovaných cyklickým namáháním v tahu (aby se omezil příznivý účinek tlakového napětí) za konstantní amplitudy napětí. Pro odhad životnosti ocelových konstrukcí se dají použít 4 běžné metody hodnocení. Dají se rozdělit na lokální (nominální napětí) a globální (Hot-Spot stress, vrubové napětí a lomová mechanika). Na rozdíl od lomové mechaniky jsou zbylé 3 metody založeny na klasifikaci zmíněných FAT křivek. Tato data jsou však určena pro vzorky s danými parametry.

U malých vzorků se předpokládá konec životnosti jejich úplným roztržením, zatímco u velkých se zpravidla pozoruje kritická velikost trhliny. V provozních podmínkách se může doba životnosti konstrukce částečně lišit a odhad nemusí být přesný. Bývá to způsobeno také zvyšujícím se počtem konstrukčních detailů, rozmanitým designem v místech svarů a různými zatěžovacími situacemi [5], [10].

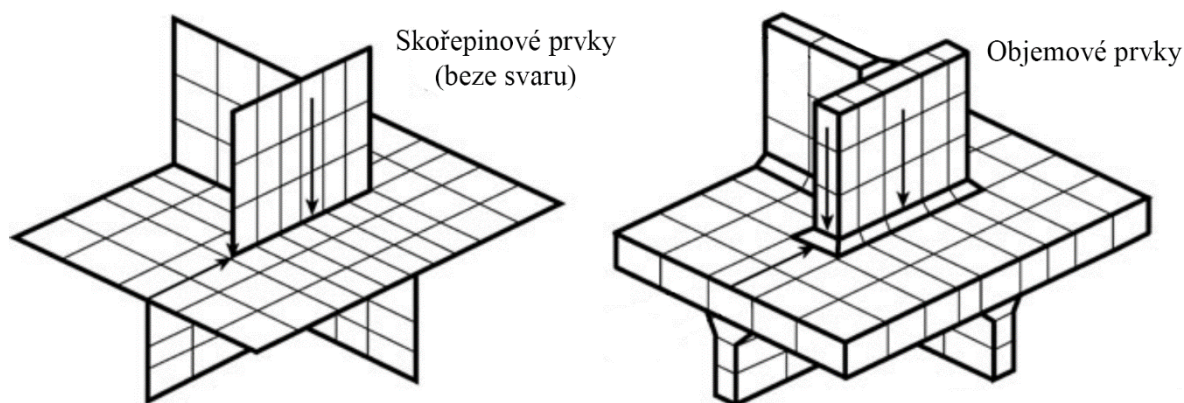
2.2.1 METODA NOMINÁLNÍHO NAPĚTÍ

Metoda nominálního napětí je nejjednodušší a nejběžnější metoda pro odhad únavové životnosti ocelových konstrukcí. Hodnoty nominálního napětí lze definovat pomocí základních výpočtů. Metoda je založena na průměrném napětí v daném průřezu základního materiálu při lineárně elastickém chování. Lokální koncentrátoři napětí v blízkosti svaru jsou v této metodě ignorovány. Do odhadu únavové životnosti jsou však zahrnuty vlivy geometrie konstrukce. Vhodné definice výpočtů nominálního napětí v kritických průřezích uvedeny v Eurokódu 3 [10].

2.2.2 METODA EXTRAPOLOVANÉHO NAPĚTÍ (HOT-SPOT STRESS)

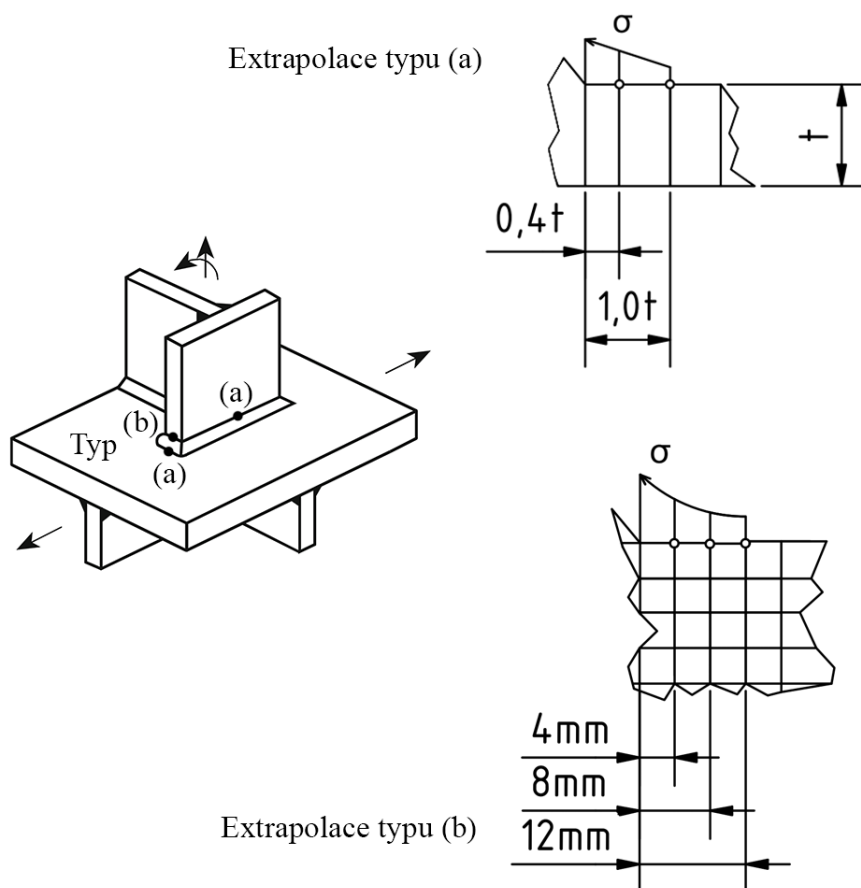
Metoda extrapolovaného napětí byla vyvinuta pro odhady únavové životnosti svařovaných konstrukcí, u kterých je obtížné zjistit nominální napětí z důvodu složité geometrie či různorodých zatížení. Tento přístup byl od 60. let 20. st. používán pro odhad únavové životnosti tlakových nádob a svařovaných trubkových konstrukcí. Později, s rozvojem MKP, byla metoda rozšířena i na složitější svařované konstrukce. Hodnota napětí v patě svaru se dá určit pomocí extrapolace tvarových napětí z referenčních bodů v blízkosti svarové housenky.

Při výpočtu touto metodou není zahrnuto špičkové napětí způsobené geometrií svaru. Tuto metodu je možné demonstrovat na příkladu koutového svaru viz obr. 4. Pro výpočet lze použít skořepinové či objemové prvky. U objemových prvků je svařenec modelován jako jeden díl. U skořepinových prvků je svarová plocha zanedbána. Model by měl umožnit lineární rozložení napětí po své tloušťce a také nárůst napětí s přibližováním se ke svarové ploše. Pro zjištění extrapolovaného napětí je v blízkosti svarové plochy vygenerována hustší síť a napětí se extrapoluje pro místo před patou svaru. Pokud nebyla svarová plocha modelována, napětí se extrapoluje do průsečíku konstrukce.



Obr. 4 Příklady sítí skořepinových a objemových prvků při zjišťování napětí. Převzato a upraveno podle [5].

Na obr. 5 jsou zobrazeny metody extrapolace napětí do paty svaru v závislosti na zvoleném bodu (a) a (b) buď pomocí tloušťky základního materiálu nebo dle přesně stanovených rozměrů prvků.



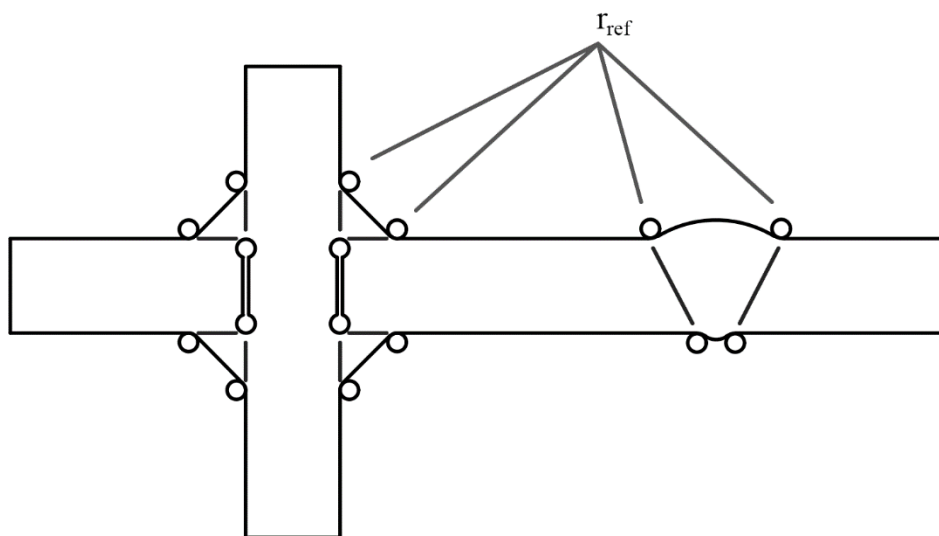
Obr. 5 Metody extrapolace napětí do paty svaru. Převzato a upraveno podle [5].

2.2.3 METODA EFEKTIVNÍHO VRUBOVÉHO NAPĚTÍ (EFFECTIVE NOTCH STRESS)

Únavová životnost svarových spojů velmi závisí na vrubových vlivech geometrických diskontinuit (díry, spoje, defekty svarů, pata svaru), které se v reálných situacích často vyskytují. Ty zapříčiňují napětovou špičku v patě svaru. Oproti metodám nominálního napětí a Hot-Spot stress zahrnuje tato metoda tloušťku materiálu i vliv kořene svaru. Lze v ní také zahrnout přítomnosti zbytkových napětí. Výhodou je také možnost modelování geometrie svarového spoje, jaká ve skutečnosti je.

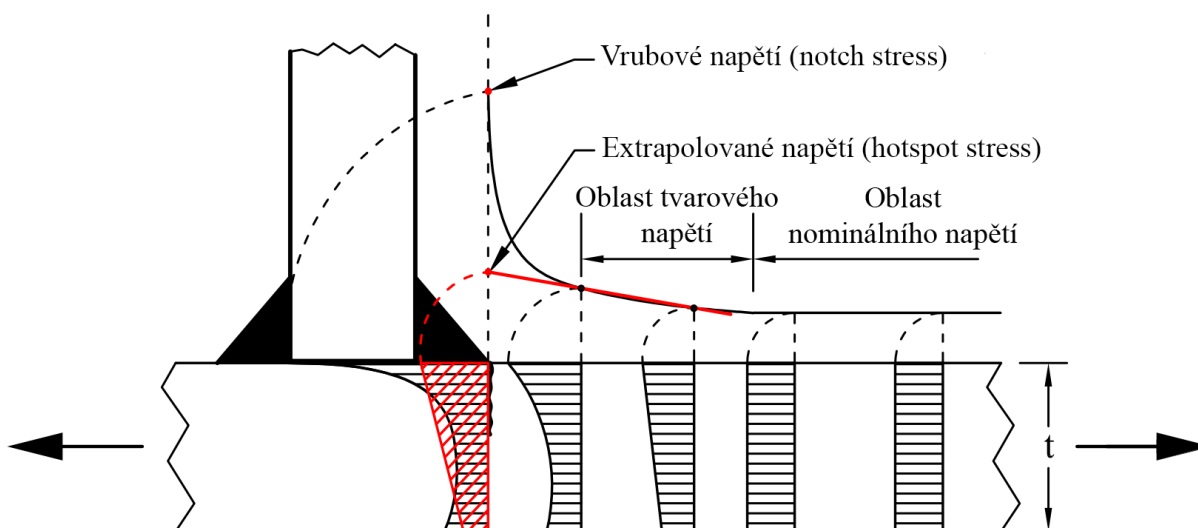
Tento přístup je založen na vyhodnocování výsledků únavových zkoušek. Napětí je zjišťováno za předpokladu lineárně elastického chování materiálu. Svarový spoj je nahrazen ideálním tvarem, kde obrys svaru (přechod mezi svarovou plochou a základním materiálem) je zaoblen rádiusem $r_{ref} = 1 \text{ mm}$. Metoda efektivního vrubového napětí je omezena na posouzení svarových spojů s ohledem na možná únavová selhání způsobená patou či kořenem svaru. Posouzení únavy základního materiálu v místě paty svaru musí být dodatečně spočteno metodou Hot-Spot. Metoda efektivního vrubového napětí je použitelná pouze pokud není převyšující složka napětí rovnoběžná se svarovou housenkou. V patě svaru je třeba předpokládat napětí alespoň 1,6 krát větší než extrapolované napětí. Metoda je ověřena zatím

pouze pro tloušťky $t \geq 5 \text{ mm}$. Pro stanovení napětí je doporučena vysoká hustota sítě o velikosti lineárních prvků $1/6$ poloměru zaoblení či kvadratických prvků $1/4$ poloměru zaoblení, která je velkou nevýhodou této metody, protože s sebou nese velkou náročnost výpočtu, zároveň možnost neomezeně složité geometrie s sebou nese zvýšenou náročnost modelování. Na obr. 6 jsou zobrazena místa zaoblení při řešení metodou efektivního vrubového napětí.



Obr. 6 Zaoblení vrubových míst svarových spojů. Převzato a upraveno podle [5].

Na obr. 7 jsou zobrazeny metody hodnocení svařované konstrukce různými zmíněnými metodami.



Obr. 7 Metody hodnocení napětí po tloušťce základního materiálu a na jeho povrchu. Převzato a upraveno podle [9].

2.2.4 LOMOVÁ MECHANIKA

Lomová mechanika se zabývá růstem trhlin se známým faktorem intenzity napětí nehledě na vliv křivek S-N. Pro posouzení bezpečnosti součásti bývá využito tzv. kritické délky trhliny. Po jejímž překročení nastává její nestabilní šíření a dochází ke zhroucení součásti. Metoda může být použita při výpočtu daných specifických případů.

3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Jedná se o numerickou výpočetní metodu používanou pro aproximaci složitých technických problémů za určitých okrajových podmínek. Metoda byla poprvé představena v 50. letech minulého století, kdy byly její výpočty zpracovávány ručně. Později byla analýza konečných prvků implementována do počítačových softwarů. Samotný název The Finite Element Method naznačuje, že se jedná o metodu využívající prvky konečných rozměrů. Každý prvek má daný počet uzlů, kterými je spojen s dalšími prvky a společně vyplňují celou řešenou oblast. MKP lze použít k řešení rozsáhlé oblasti technických problémů zahrnujících analýzu napětí, přenos tepla, elektromagnetismus, proudění kapalin a podobně [11].

3.1 VÝPOČETNÍ MODELOVÁNÍ POMOCÍ MKP

Při analýze pomocí MKP je řešená oblast rozdělena na konečný počet prvků (diskretizace), které tvoří síť modelu. Prvky mohou mít různé tvary a velikosti, které udávají počet uzlů v síti. V těchto oblastech jsou hledány neznámé parametry (posuvy, natočení, teplota a jiné). Pomocí okrajových podmínek (omezené posuvy, silové působení, teplotní působení apod.) je následně hledáno spojitě řešení úlohy, které vede na řešení soustavy lineárních rovnic.

S větším počtem uzlů roste náročnost výpočtu, a proto je nutné využít vhodný hardware pro větší efektivitu. Nicméně je také důležitá znalost a cit pro základní principy mechaniky těles při výpočtech pro přesné určení výsledných hodnot [12].

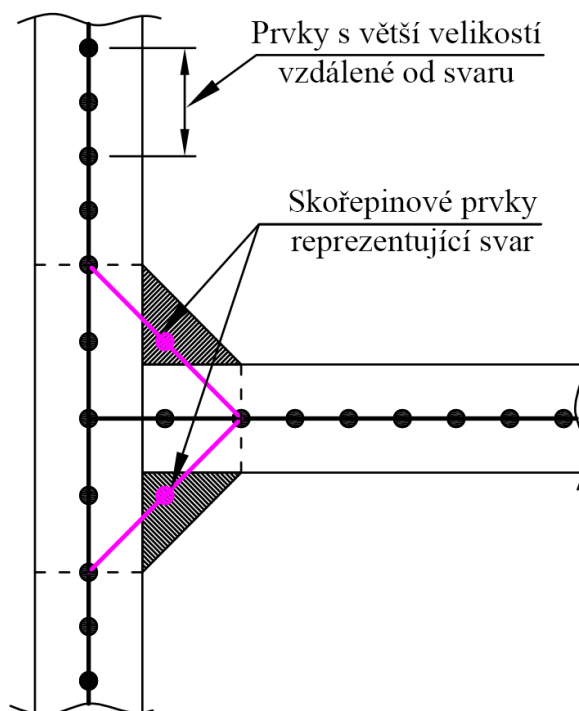
3.2 VYUŽITÍ MKP PŘI ŘEŠENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ

MKP lze při řešení svarových spojů využít jak pro proces svařování, tak i pro analýzu následných zátěžových stavů. Hlavní výhodou je možnost simulace celého procesu svařování (i v časové závislosti) a podle ní možnost předpovědět případné poruchy. V současné době se numerické simulace svařování používají především v automobilovém, energetickém, lodním a leteckém průmyslu [6]. Jak již bylo zmíněno, únavové hodnocení a analýza ocelových konstrukcí bývají obecně založeny na řešení pomocí nominálního napětí. Tento přístup může být však obtížný nebo dokonce nereálný pro řešení geometricky složitějších útvarů. Zde bývá vhodné použití extrapolovaného napětí, které udává nárůst napětí v místě paty svaru. Využití MKP pro stanovení napětí ve svařovaných konstrukcích pomocí simulací zatěžování je dnes velmi časté. Obzvláště je vhodné u geometricky složitých konstrukcí, kde nelze rozlišit, zda je nelineární růst napětí způsobený patou svaru či nepravidelností geometrie součásti. Nesprávný přístup řešení by zde mohl vést ke vzniku předčasných únavových trhlin. Diskutabilní mohou být místa závaru (tepelně ovlivněná oblast) a tedy definování kontaktu mezi materiálem základním a přídavným. Pro co nejpřesnější určení napětí v okolí svarů je vhodné použití jemné sítě konečných prvků [9]. Výsledky zmíněných analýz bývají však citlivé na způsob modelování, protože výsledné zjišťované hodnoty bývají v blízkostech napětíových singularit (ostré hrany).

Simulace zbytkových napětí pomocí MKP s využitím 3D modelu obecně zahrnuje mnoho jevů, jakožto teplotně závislé nelineární chování materiálu – změny mikrostruktury materiálu. Tento způsob simulace detailně zobrazuje mnohé vlastnosti spoje, bývá však v některých případech příliš náročný pro řešení. V těchto případech jsou namísto simulace ve 2D využívající aproximaci zbytkových napětí ze 3D modelu. Stejně tak bývá vhodný přechod z objemových prvků na skořepinové a naopak, v závislosti na požadované přesnosti a náročnosti úlohy. U svarových spojů zatížených napětím v ohybu je doporučeno svary modelovat objemovými prvky jakožto vhodnými nositeli tuhosti konstrukce [7].

3.2.1 TECHNIKY MODELOVÁNÍ SVAROVÝCH SPOJŮ

Techniky modelování bývají voleny podle požadovaných výsledků. Při užití správné techniky modelování se dá docílit požadované tuhosti svaru pomocí nahrazení geometrie svaru skořepinovými prvky. V tomto případě je důležité provedení spoje dvou desek v průsečíku kontaktních uzlů dle obr. 8. Skořepinové prvky definující svarový spoj by měly mít požadovanou tloušťku odpovídající tloušťce svaru. Tato metoda je spíše přibližná, její využití je možné při odhadu únavové životnosti svarového spoje [9].



Obr. 8 Užití skořepinových prvků při modelování svarových ploch. Převzato a upraveno podle [9].

Pro přesnější určení napětí ve svaru je vhodné užití jiných technik. Existuje mnoho dalších podobně charakterizovaných technik zahrnujících kombinace různých typů prvků (objemové versus skořepinové), modelování konců svarů, kde vznikají iniciace šíření únavových trhlin a zároveň geometrie této oblasti způsobuje vznik singularit napětí. V technice modelování konců svarů bývají v blízkosti svarového spoje vytvořeny kruhové díry, aby snížily vliv singularity konce svaru. Tato technika má své využití např. při navrhování mostů. Pro navrhování svaru proti prasknutí v kořenu je vhodné použít metod s objemovými prvky, které lépe reprezentují svarovou plochu a svým objemovým podílem konstrukci dodávají potřebnou tuhost při výpočtu. Při kombinaci objemových a skořepinových prvků, kde svarovou plochu reprezentují objemové prvky, je důležitá speciální technika pro nastavení kontaktů. Důvodem je skutečnost, že skořepinové prvky mají v každém uzlu 5 stupňů volnosti, zatímco objemové 3 a ohybové momenty zatěžující součást je třeba korektně přenést mezi jednotlivými typy prvků. Další techniky modelování jsou podrobně popsány v [9].

3.3 SOFTWARE PRO ŘEŠENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ POMOCÍ MKP

Velkou výhodou, kterou nabízí softwary na výpočetní modelování, je simulace chování průběhu výroby a následného používání produktů. Tvorba optimálního modelu mnohdy bývá

iteračním procesem. Tímto způsobem řešení se však dá docílit levné výroby a požadované životnosti produktu. Cílem společností nabízejících výpočetní softwary, kterými se zabývá v následujících kapitolách, je především zajistit simulace modelu při reálných podmínkách, snížit výrobní náklady, ověřit nápady, minimalizovat dobu výroby a zvýšit kvalitu výrobku [13], [14], [15], [16].

4 ANSYS

4.1 SPOLEČNOST ANSYS, INC.

Společnost Ansys, Inc. byla založena roku 1970 se sídlem v USA. Jedná se o společnost vyvíjející celosvětově nejrozšířenější software pro numerické simulace široké škály technických problémů. Společnost aktuálně zaměstnává přes 2900 odborníků v oblastech MKP, mechaniky tekutin, elektroniky a elektromagnetismu a optimalizace designu. Aktuálně má pobočky i v Evropě a v Asii. Nabízí produkty pro řešení problematiky z oblastí mechaniky, mechaniky tekutin, optiky, materiálů, elektromagnetismu a mnohé další. Společnost nabízí celou řadu bezplatných softwarů pro studenty. Spolupracuje se strategickými partnery jako Microsoft, Synopsys, Ptc, Rockwell Automation, Autodesk a SAP, kteří pomáhají Ansysu v rozšiřování simulací do více inženýrských odvětví [11], [13].

4.2 ANSYS WORKBENCH™

Ansys sice nenabízí software určený přímo na řešení svarových spojů, chlubí se však svými multifyzikálními platformami jako je např. Ansys Workbench. Jde o platformu, ve které se nachází soubor různých inženýrských simulačních technologií. Geometrie lze zadat pomocí Design Modeleru nebo Space Claimu. Program podporuje CADovské soubory s příponou „.step“ atd., je tedy možný import geometrie. Nabízí automatické vytváření sítě konečných prvků. Jakožto multifyzikální platforma umožňuje propojení analýz z různých inženýrských odvětví a tím vytvoření reálnějších podmínek pro řešení [13].

4.3 SVAROVÉ SPOJE ŘEŠENÉ V ANSYS WORKBENCH

Jak již bylo zmíněno, Ansys je univerzálním softwarem, přímé řešení svarových spojů však nenabízí. Navíc software Ansys nepodporuje fázové přeměny materiálů. Tato skutečnost je velkým ulehčením analýzy, ale zároveň velmi zmenšuje přesnost výsledků. V analýze je vhodné použití materiálu, u kterého fázové přeměny za daných podmínek nehrozí. Pro analýzu svarových spojů lze užít doporučení zmíněných v kapitole 2 jako i standardu IIW. Výpočetní modelování v Ansysu podle IIW je podrobně rozebráno v [9], [5], [17], [18].

4.4 ANSYS ACT (APPLICATION CUSTOMIZATION TOOLKIT)

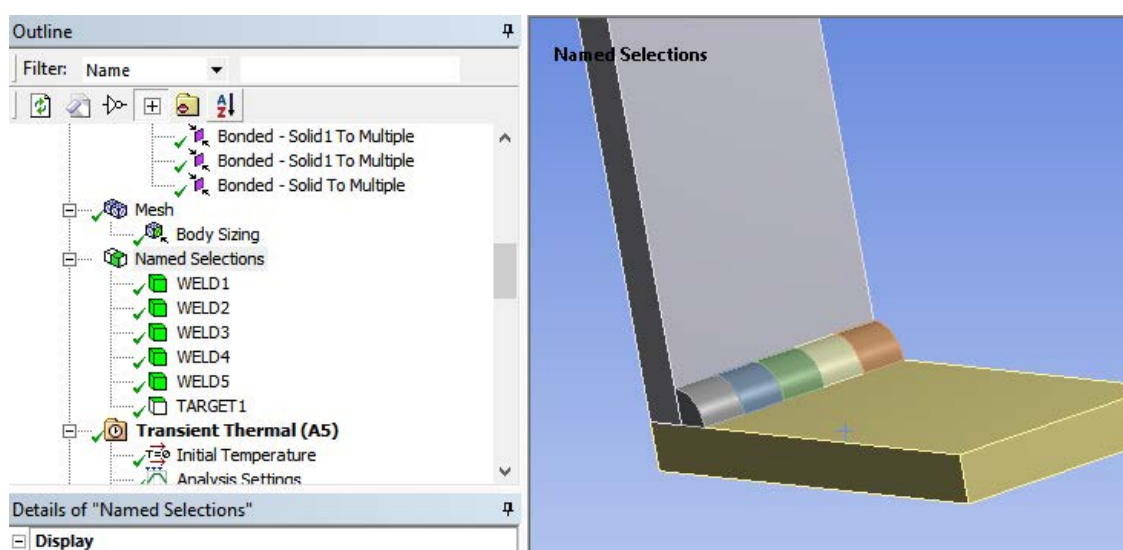
Zkratka ACT sama vypovídá o funkci nástroje. Jedná se o nástroj pro integraci aplikací třetích stran do cílového Ansys softwaru k rozšíření jeho nativních funkcí. ACT nástroj umožňuje automatizovat simulace vytvořením vlastních procesů. Ansys svá rozšíření propaguje s myšlenkou potřeby nižších znalostí softwaru pro jeho efektivní používání. Jednotlivá rozšíření nabízí ulehčení tvorby analýz prostřednictvím přidané lišty s novými možnostmi řešení ve stávajícím prostředí softwaru. Rozšíření především poskytují specifická řešení, dle požadavků zákazníka. Jejich velkou výhodou bývají okna pro nastavování simulace, ve kterých jsou jednotlivé kroky výpočtu přehledně na jednom místě. Stahování aplikací je možné v ANSYS App Store [19], kde jsou aplikace dostupné výhradně prostřednictvím zakoupení roční licence nebo ke stažení zdarma. Společnost Ansys, Inc. je navíc otevřená návrhům zákazníka pro vývoj ACT modulů a umožňuje jim vytvářet jejich vlastní aplikace, které následně mohou sdílet v ANSYS App Store. Podrobné postupy při zájmu spolupráce jsou dohledatelné v [13]. V následujících podkapitolách jsou zmíněny aplikace umožňující rozšíření softwaru Ansys Workbench pro snadnější řešení svarových spojů. Podkapitoly jsou z velké části inspirovány [19].

4.4.1 WELDING DISTORTION WIZARD

Jde o průvodce pro automatizaci nastavování simulací procesů svařování. Cílem rozšíření je simulovat deformace v průběhu a po procesu svařování. Simulace probíhá při daných teplotách v závislosti na časovém intervalu. Aplikace je vyvíjena společností Ansys, Inc., která ji nabízí zdarma ke stažení. Využití nástroje sestává z následujících kroků.

PŘÍPRAVA GEOMETRIE

Geometrie svarového spoje je předem vymodelována v příslušném softwaru např. SpaceClaim. Pokud není sdílená topologie svarové housenky a základního materiálu, kontaktní plochy svaru jsou automaticky vytvořeny a očíslovány podle definovaného směru svařování. Jinak je potřeba svar určit ručně. Automaticky vytvořené selekce svaru viz obr. 9.



Obr. 9 Rozložení svarové plochy na jednotlivé části. Převzato z [19].



DEFINICE MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ A TVORBA SÍTĚ KONEČNÝCH PRVKŮ

Vlastnosti materiálů a síť konečných prvků jsou zadávány běžnými způsoby v Ansys Workbench. Z hlediska oblasti řešení této úlohy je dále vyžadováno propojení termální a strukturální analýzy.

NASTAVENÍ MODELU SVAŘOVÁNÍ VE WIZARDU

Po zadání parametrů (definování částí svaru, rychlosti svařování, maximální teploty a teploty chlazení) v nastavení Wizardu zobrazeném na obr. 10, se automaticky vytvoří okrajové podmínky, které je možno doplnit vlastními podle specifických požadavků (nulové posuvy apod).

Wizard

 **Welding Distortion Wizard** 

Mechanical
Model Setup:
Welding Process

NS 1-Skip / 0-Create

N welding toes

N of welding bodies on each... [Edit](#)

Total welding time sec

Total cooling time sec

Melting Temperature C

0-Contacts/1-Share topo

Help

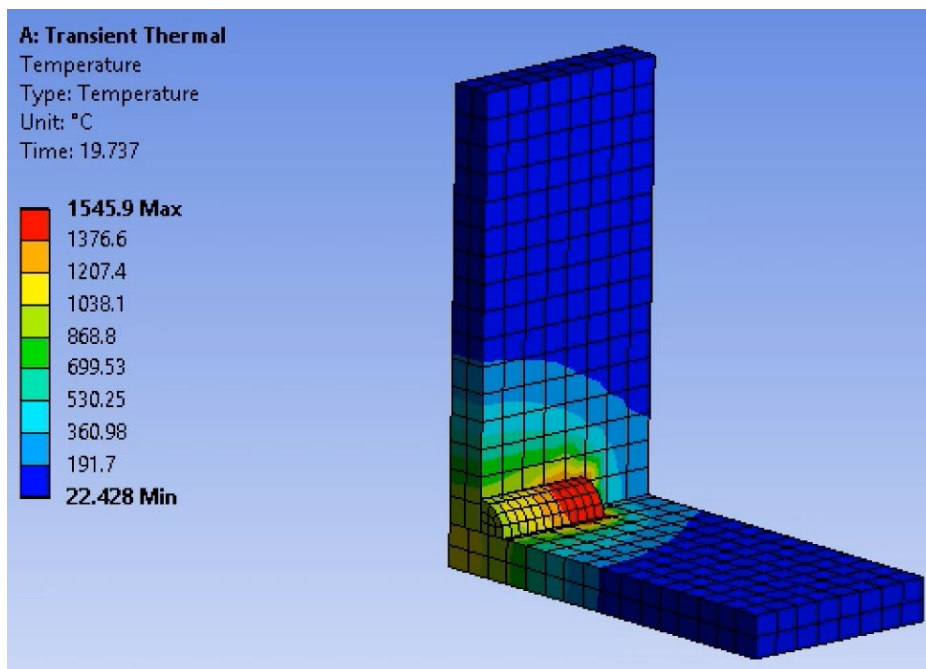
- **NS 1-Skip / 0 Create:** Automatic Creation of NS:WELD1, WELD2, , WELD...
If 1, you need to use WLINEi, B1_WLi as explained on documentation
- **N welding toes:** Number of welding lines
- **N of welding bodies on each welding toea:** Each row of the table is a different welding line and on each cell the number of bodies should be included
- **Total welding time**
- **Total cooling time**
- **Melting Temperature:** Reference temperature
- **Create contacts (0) or use Shared topo (1):** 0 creates contacts between the welding bodies and the named selection "TARGET". 1 assumed that the us... is using shared topology and contacts are not created

[Exit Wizard](#) [Back](#) [Finish](#)

Obr. 10 Wizard nastavení modelu svaru. Převzato z [19].

POST-PROCESSING

Po dokončení analýzy lze zobrazit animace vypočtených hodnot. Na obr. 11 je zobrazena teplotní závislost na čase v průběhu procesu svařování.



Obr. 11 Zobrazení výsledku analýzy svarového spoje. Převzato z [19].

ZHODNOCENÍ NÁSTROJE

Tento nástroj je vhodný pro automatizaci simulace průběhu svařování a pro posouzení vzniku deformací v průběhu a po svařování v důsledku teplotní roztažnosti materiálu. Rozšíření se dá použít k hodnocení vlivu upevňovacích prvků v průběhu svařování, případně k jejich návrhu. Vznik TOO v analýze není zohledněn. Nástroj je dostupný ke stažení zdarma.

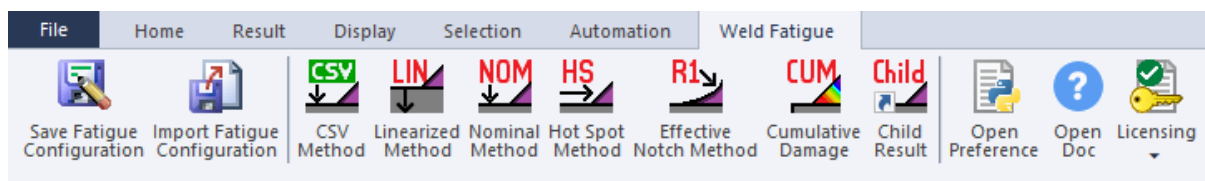
4.4.2 WELD FATIGUE

Tato aplikace je vyvíjena britskou společností EDRMedeso. Společnost nabízí rozšíření pro pokročilejší možnosti simulace jiných softwarů. Nástroj Weld Fatigue je vhodný pro urychlení hodnocení únavy svarových spojů dle doporučení IIW v Ansys Workbench. Výpočty napětí jsou v souladu s výpočtem modelováním svarových spojů zmíněném v kapitole 2. To zahrnuje výpočet životnosti, poškození, faktorů bezpečnosti, rozsahů napětí a dalších. Výhodou aplikace je možnost hodnocení poškození, bezpečnosti a redukovaného napětí pro kumulativní charakterystiky namáhání z několika zatěžovacích cyklů. Další možností je korekce středního napětí podle Haighova diagramu. Stažení tohoto rozšíření je možné v ANSYS App Storu za roční předplatné 2500 \$.

PROSTŘEDÍ ANSYS WORKBENCH

Přidáním aplikace do systému Ansys se stávající prostředí rozšíří o lištu s novými možnostmi výpočtů svarů dle obr. 12. Toto rozšíření poskytuje vyhodnocení únavy metodami nominálního napětí, Hot-Spot, vrubového napětí, linearizovaného napětí, CSV metodou, která vyhodnocuje

únavu pomocí napětí zadaných v textovém souboru CSV a kumulativního poškození. Aplikace dokáže řešit v různých zatěžovacích stavech více svarů najednou.



Obr. 12 Panel výpočtových funkcí programu Weld Fatigue. Převzato z [19].

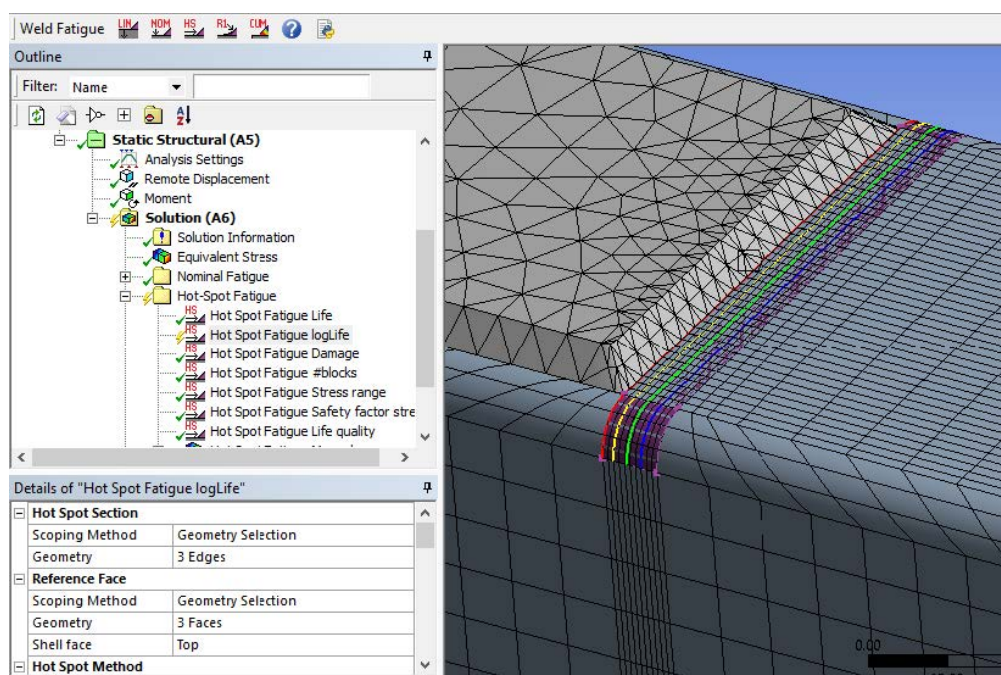
Aplikace je kompatibilní s řešením skořepinových, objemových prvků i jejich kombinací. Jejich použití je zachyceno v tab. 1.

Tab. 1 Oblasti využití skořepinových a objemových prvků při výpočetním měření svarů.

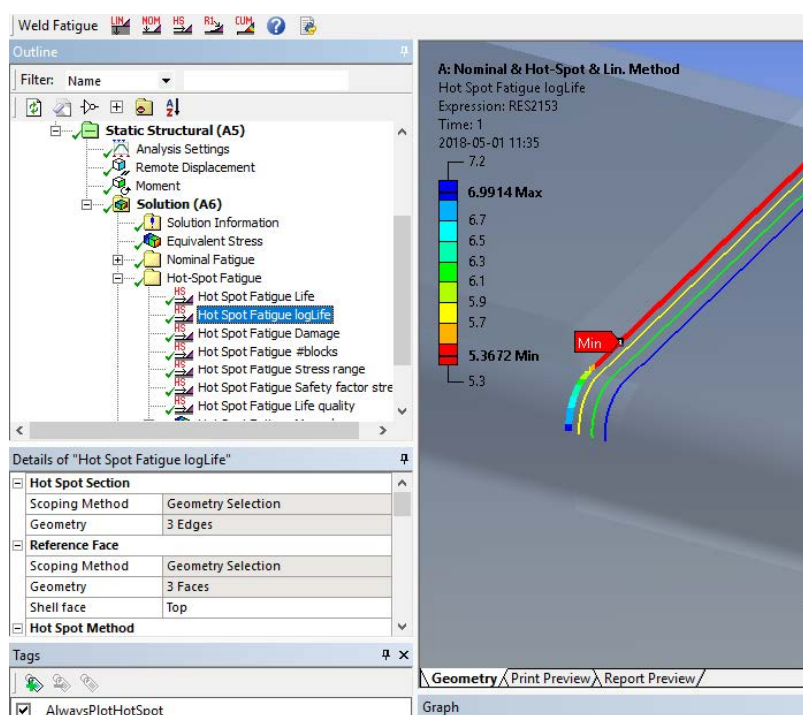
Metoda	CSV	Metoda linearizovaného napětí	Metoda nominálního napětí	Metoda Hot-Spot	Metoda vrubového napětí
Skořepinové prvky	ANO	NE	ANO	ANO	NE
Objemové prvky	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Metodou linearizovaného napětí je napětí vypočteno po tloušťce součásti v místě paty svaru. Tato metoda nevyžaduje příliš jemnou síť jako metoda Hot-Spot, a tak mohou chybět místní vrubové účinky. Výsledek je proto spíše orientační. Metoda nominálního napětí je platná jen do meze kluzu materiálu, po jejím překročení se v programu zobrazí varovná zpráva. Při hodnocení metodou Hot-Spot je před vyhodnocením výsledku možné na modelu vykreslit extrapolací křivky viz obr. 13. V závislosti na zadaném zatížení, dokáže program rozeznat typ zatěžovacího cyklu podle vypočtených napětí.

Na obr. 14 je vykreslen výsledek výpočtu extrapolovaného napětí při únavovém namáhání. Podle použité metody lze z výsledků vykreslit S-N křivky s porovnáním různých materiálů. Program umožňuje export únavové analýzy do textového souboru CSV pro následná řešení v jiných programech.



Obr. 13 Oblast extrapolace metodou Hot-Spot při hodnocení únavového života.
Převzato z [19].



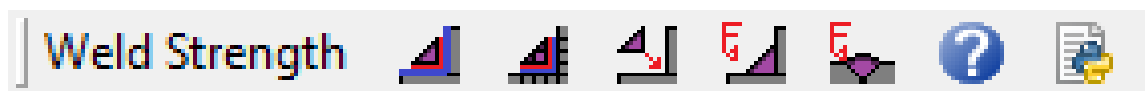
Obr. 14 Ukázka výsledku analýzy únavového života metodou Hot-Spot. Převzato z [19].

ZHODNOCENÍ NÁSTROJE

Toto rozšíření je vhodné pro automatizaci výpočtů napětí a predikci únavové životnosti součástí dle metod nominálního napětí, Hot-Spot a efektivního vrubového napětí, zmíněných v kapitole 2. Jeho funkčnost je efektivnější při kombinaci s dalšími nástroji od EDRMedeso (Weld Strength). Výrobce nabízí roční licence nástroje za 2500 \$.

4.4.3 WELD STRENGTH

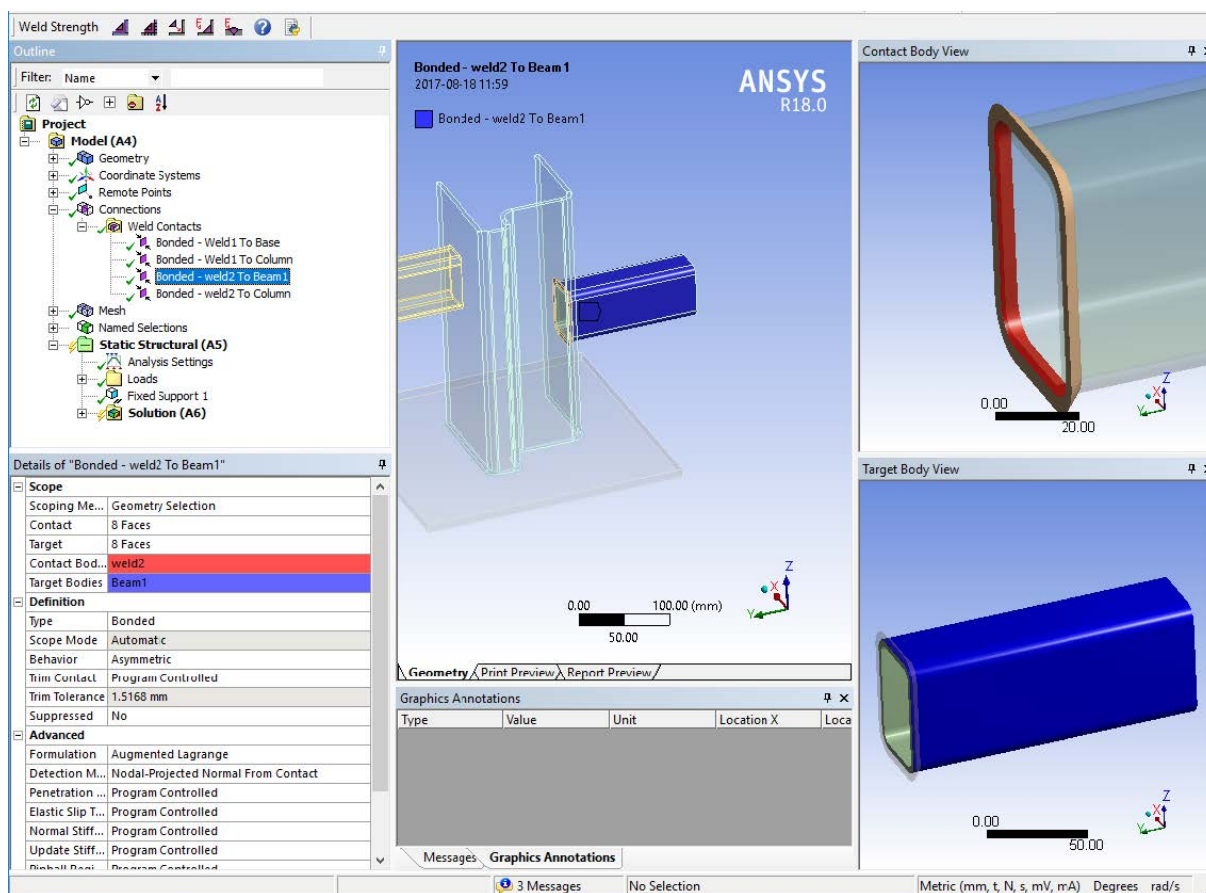
Weld Strength je další aplikace vyvíjená organizací EDRMedeso, její cena za roční předplatné činí v ANSYS App Storu 2500 \$. Aplikace je vhodná pro vytváření tupých a koutových svarů a hodnocení jejich pevnosti podle Eurokódu 3, viz [10], nebo jiných, uživatelem definovaných parametrů. Přidáním aplikace do softwaru Ansys se v pracovním prostředí zobrazí Weld Strength panel nástrojů dle obr. 15. Svary vytvořené touto aplikací lze řešit i pomocí ostatních rozšíření softwaru Ansys. Funkce nástroje Weld Strength jsou rozděleny následovně.



Obr. 15 Panel funkcí aplikace Weld Strength. Převzato z [19].

TVORBA SVAROVÉHO KONTAKTU

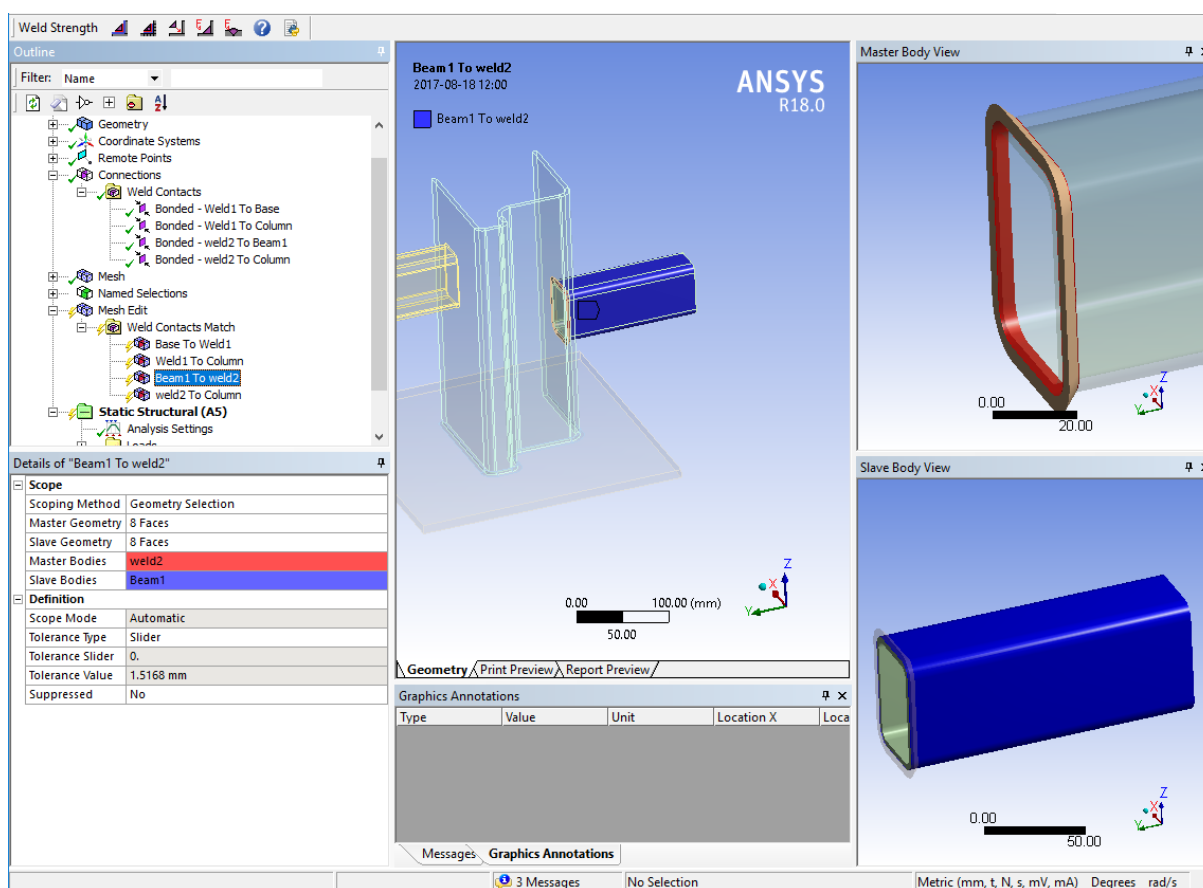
Tato funkce je vhodná v případě, že byly svary vytvořeny předem ve formě objemových těles. Pro její automatizaci je doporučeno přejmenovat všechna tělesa svarů na „Weld“, případně „weld“ a poté kliknout na tlačítko vytvořit svarový kontakt. Tím se vytvoří ve složce „Connections“ nová skupina „Weld Contacts“ obsahující kontakty „Bonded“ mezi svary a zbytkem konstrukce viz obr. 16.



Obr. 16 Svarové kontakty vytvořené aplikací Weld Strength. Převzato z [19].

SHODA SVAROVÝCH KONTAKTŮ

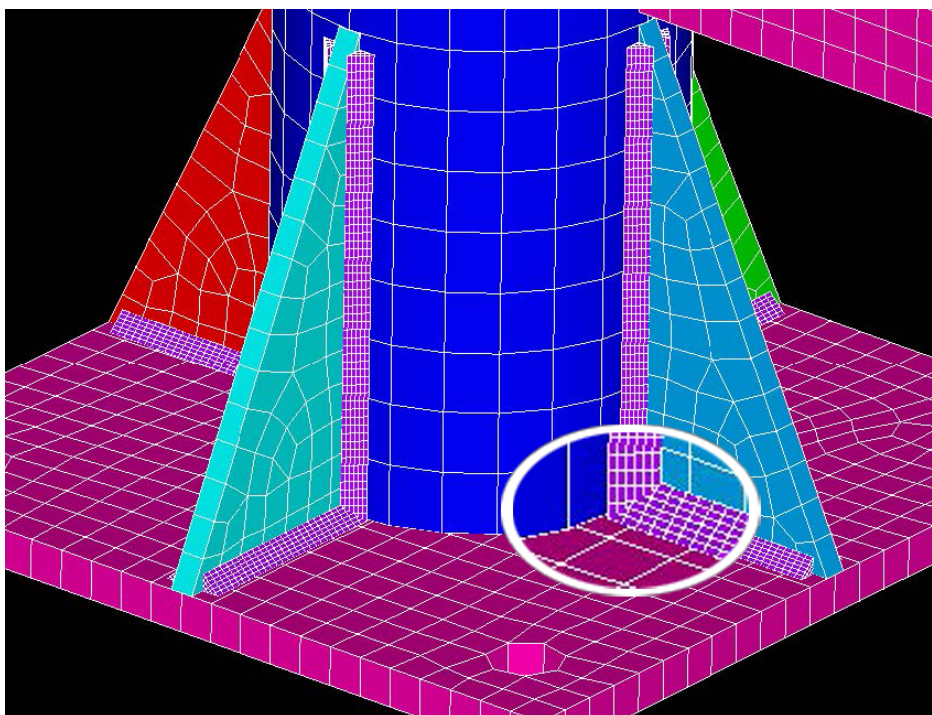
Tato položka navazuje na předchozí funkci a je určená pro zlepšení kvality kontaktů mezi součástmi. Pokud jsou mezi jednotlivými součástmi rozdíly ve velikostech prvků, tato položka v kontaktech vytvoří síť konečných prvků požadovaného typu a hustoty. Úprava sítě se poté zobrazí ve skupině „Weld Contacts Match“, která je umístěna ve složce „Mesh Edit“ viz obr. 17.



Obr. 17 Úprava sítě v kontaktech konstrukce. Převzato z [19].

PŘIDÁNÍ KOUTOVÉHO SVARU

V případech, kdy nejsou svary v konstrukci modelovány, je tato funkce automaticky vygeneruje (svarové křivky, svary typu – objemové prvky). Pokud jsou mezi hranami součásti úhly větší než 45° , je svar rozdělen, aby se zabránilo deformacím prvků viz obr. 18. Výsledky napětí ve svaru lze vykreslit buď pro celý model nebo pro konkrétní místa. Touto funkcí lze různě nastavovat tvar svaru (geometrie, tloušťka, posunutí volného konce apod.), materiál a další vlastnosti k odhadnutí nákladů. V případě potřeby lze výsledek této procedury použít pro jiné analýzy (termální) či exportovat do CAD programů.



Obr. 18 Rozdělení sítě koutových svarů na 2 části. Převzato a upraveno podle [19].

VÝPOČET PEVNOSTI KOUTOVÉHO A TUPÉHO SVARU

Tyto 2 funkce nabízí urychlení výpočtu vytvořením skupiny svarových řezů podle jejich vzájemného vlivu a polohy.

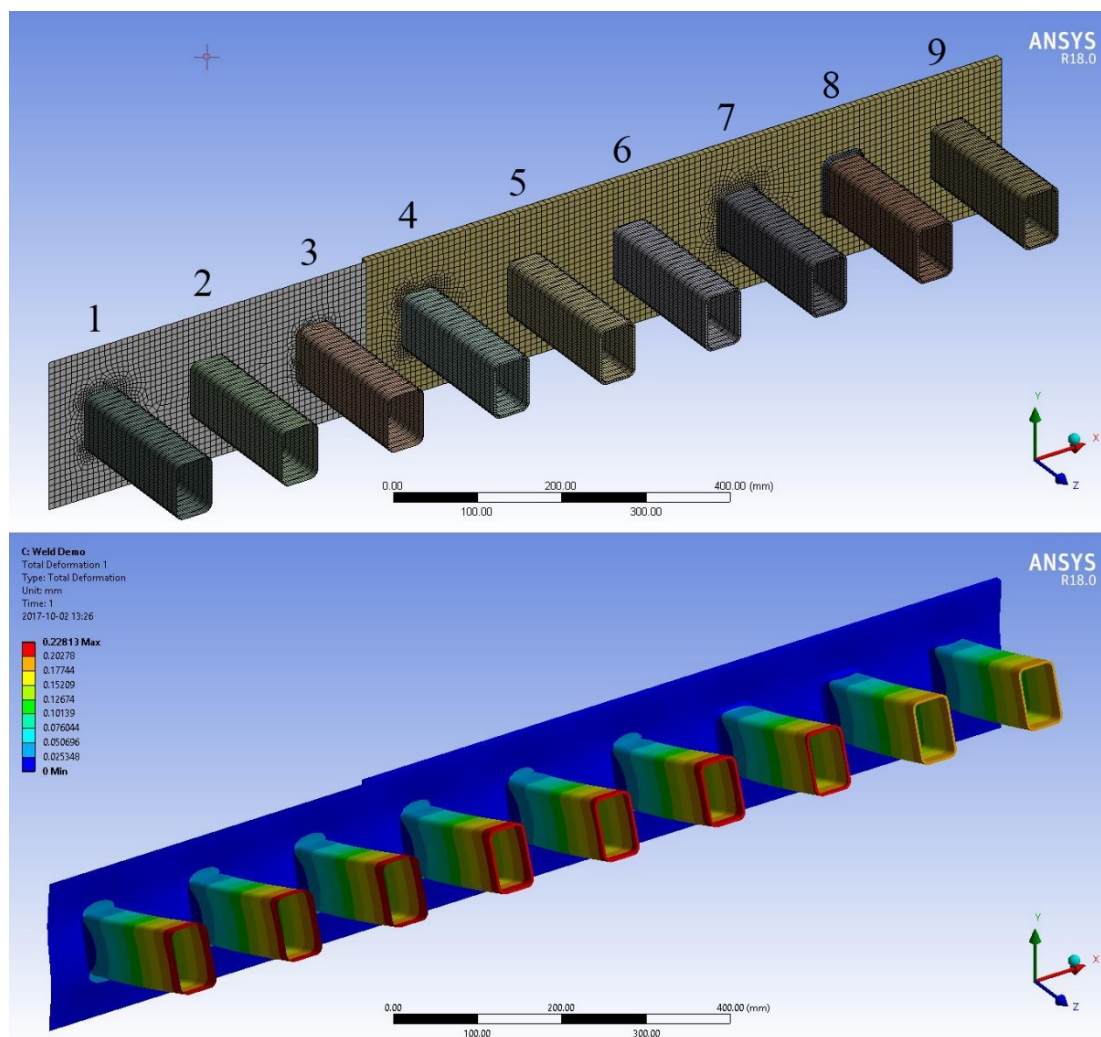
PŘEDVOLBY

V aplikaci je v základním nastavení řešení svarů podle Eurokódu 3 [10]. V modulu Python lze nastavení předvoleb upravit na jiný kód.

SROVNÁNÍ RŮZNÝCH METOD SÍŤOVÁNÍ SPOJŮ PODLE WELD STRENGTH

Metoda spojení dvou součástí může podstatně ovlivnit výsledek. Na obr. 19 je zobrazeno porovnání vlivu ohybového zatížení na metodách síťování spojů součástí se stěnou pomocí rozšíření Weld Strength. Body 1-3 jsou zaměřeny na spojení dvou součástí ze skořepinových prvků bez svaru pomocí sdílené topologie, kontaktu křivky s plochou a funkce „mesh connection“. Body 4-6 ukazují spojení objemových součástí bez svaru s deskou také z objemových prvků pomocí sdílené topologie, kontaktu mezi plochami a kontaktu mezi křivkou a plochou. V bodech 7-9 byly použity také objemové prvky, ale nyní s modelem svaru. Zde byla použita opět sdílená topologie, kontakt mezi plochami a v posledním případě byl svar přidán pomocí panelu v aplikaci Weld Strength.

Z vlivu zatížení ohybovým momentem bylo poukázáno, že konstrukce, u kterých byl použit svar z objemových prvků (7-9), se méně deformují. Je to způsobeno tím, že svary dodávají konstrukci tuhost. U zbylých konstrukcí bez vymodelovaného svaru docházelo k téměř totožné deformaci. Modelování součástí s fiktivním prvkem svaru je však značným ulehčením výpočtu a je tedy vhodným řešením pro některé odhady chování svarových spojů.



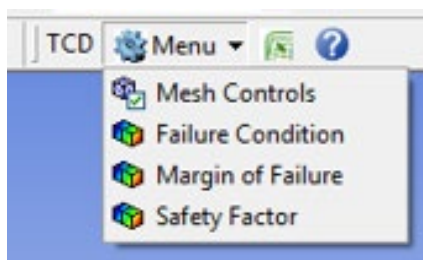
Obr. 19 Porovnání vlivu metod síťování svarových spojů na výslednou deformaci.
Převzato z [19].

ZHODNOCENÍ NÁSTROJE

Pomocí tohoto rozšíření se dají efektivně nastavit kontakty mezi svary a základním materiálem nebo v případech, kdy svary nejsou vymodelovány, je lze vygenerovat. Dále je možné vyhodnocení pevnosti svarů podle Eurokódu 3 [10] nebo dle jiných zadaných parametrů. Výpočet pevnosti je možné v rozšíření provést pro různé kombinace modelů konečných prvků (kombinace skořepinových a objemových prvků apod.). Předplatné roční licence tohoto rozšíření činí 2500 \$.

4.4.4 TCD EXTENSION

Toto rozšíření je vyvíjeno společností CADFEM. V Ansys App Storu je dostupné zdarma. Aplikace tohoto rozšíření spočívá v doporučení TCD (Theory of Critical Distance), neboli lomové mechaniky, pro svarové spoje a jiné součásti. Toto doporučení se zabývá kritickou délkou únavové trhliny a plastickou oblastí v jejím okolí. Na obr. 20 je zobrazen panel nástrojů TCD Extension. Využití jeho funkcí je popsáno níže.



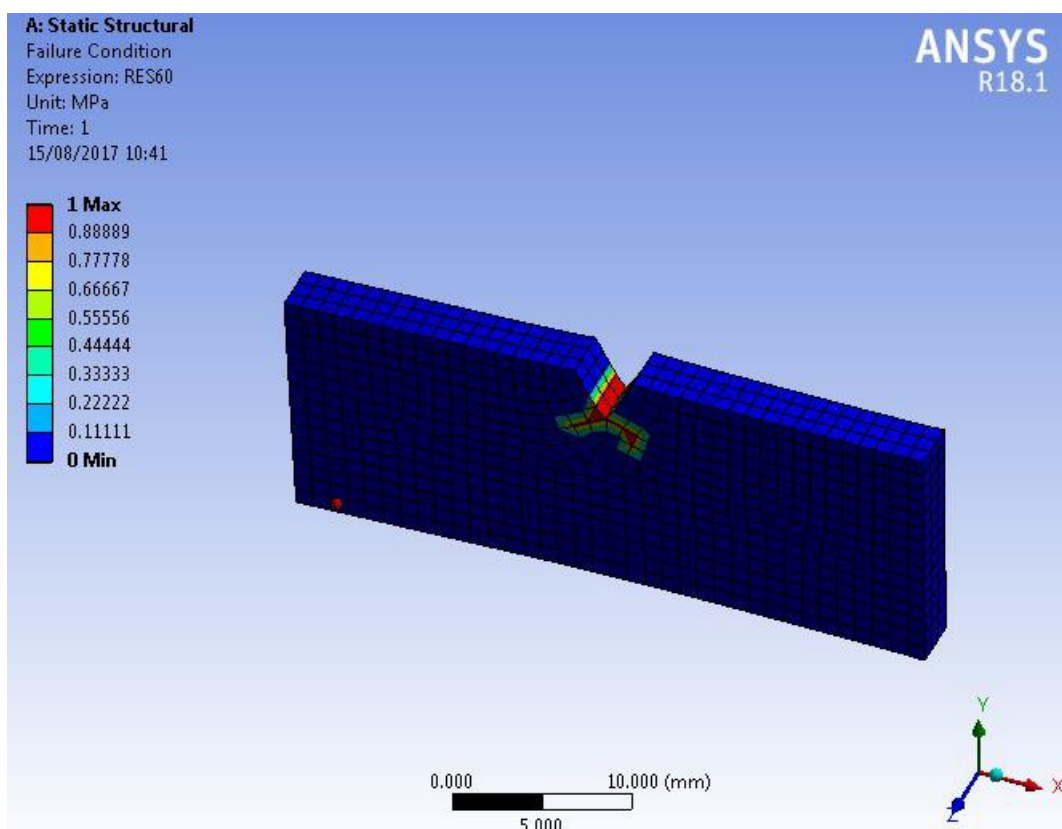
Obr. 20 Panel nástrojů TCD
Extension. Převzato z [19].

MESH CONTROLS (NASTAVENÍ SÍTĚ KONEČNÝCH PRVKŮ)

Tato funkce automaticky nastavuje hustotu sítě a typ prvků dle zvolené teorie analýzy TCD.

FAILURE CONDITION (PŘEDPOKLAD ÚNAVOVÉHO SELHÁNÍ)

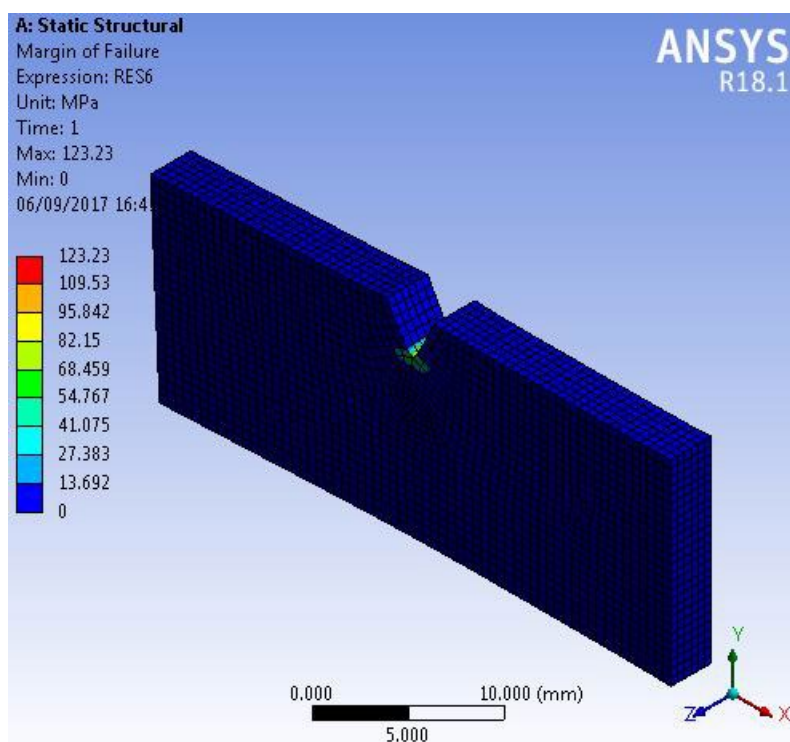
Tato položka se po kliknutí umístí do sekce „Solutions“. V místech, kde hrozí únavové selhání součásti podle TCD je ve výsledku analýzy zobrazena 1 (červeně) a 0 (modře) v místech, kde software vyhodnotí součást jako bezpečnou. V případě, že hrozí únavové selhání, objeví se varovné okno se zprávou. Na obr. 21 je zobrazen předpoklad selhání součásti.



Obr. 21 Vyhodnocení potenciálních míst selhání součásti. Převzato z [19].

MARGIN OF FAILURE (OKRAJOVÉ SELHÁNÍ)

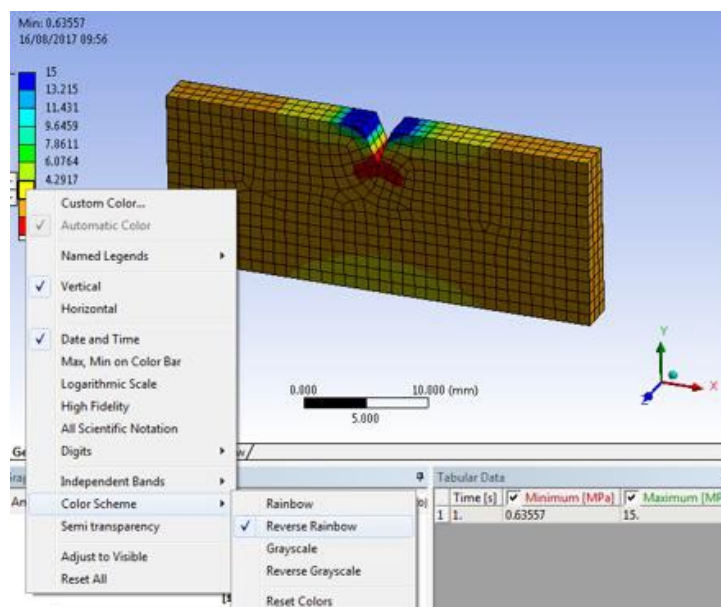
Udává uživateli představu o tom, jak moc bylo překročeno kritického napětí šíření trhliny. Všechna místa na obr. 22, která mají větší hodnotu než 0, jsou vyhodnoceny jako místa selhání.



Obr. 22 Vyhodnocení míst selhání součásti. Převzato z [19].

SAFETY FACTOR (KOEFIČIENT BEZPEČNOSTI)

Uvádí výši bezpečnosti v místech modelu. Ve výpočtu se bezpečnosti zobrazí seřazeny od nejmenší hodnoty. Pro přehlednější zobrazení vývojář doporučuje nastavení upravit dle obr. 23.



Obr. 23 Výpočet bezpečnosti vůči šíření trhliny. Převzato z [19].

MATERIÁLY A NÁPOVĚDA

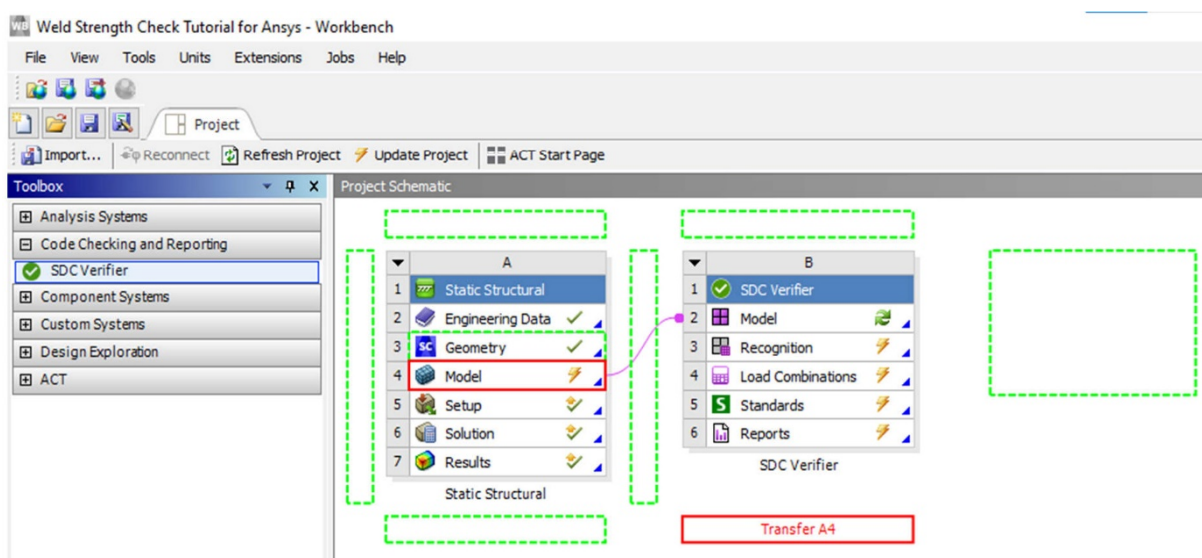
Tlačítko se vzhledem Microsoft Excel skrývá databázi materiálových parametrů v závislosti na kritické délce trhliny. Tyto hodnoty je možné v softwaru Ansys libovolně upravovat. Políčko nápovědy zobrazí dokument s tipy na používání rozšíření TCD Extension.

ZHODNOCENÍ NÁSTROJE

Toto rozšíření není typické pro řešení svarových spojů, nicméně si může nalézt využití při řešení specifických typů analýz pro vyhodnocení bezpečnosti svarového spoje vůči šíření trhlin. Rozšíření využívá pro výpočty analýz lomovou mechaniku. Společnost CADFEM ho nabízí zdarma ke stažení.

4.4.5 SDC VERIFIER – ANSYS PLUGIN

SDC Verifier je modul pro Ansys Workbench zaměřený na ověřování konstrukcí podle standardů zmíněných v kapitole 2 (Eurokód 3 [10]), anebo standardů definovaných uživatelem. Samotný modul je zdarma, je ale rozdělen na jednotlivá rozšíření s konkrétním zaměřením, která už jsou zpoplatněna. Modul se v Ansys Workbench aplikuje přesunutím položky „SDC Verifier“ na „Model“ ve strukturální analýze. Po tomto úkonu vznikne požadované okno SDC Verifier. Na obr. 24 je zobrazeno prostředí Ansys Workbench s aplikovaným modulem. Tato kapitola je inspirována z [20].

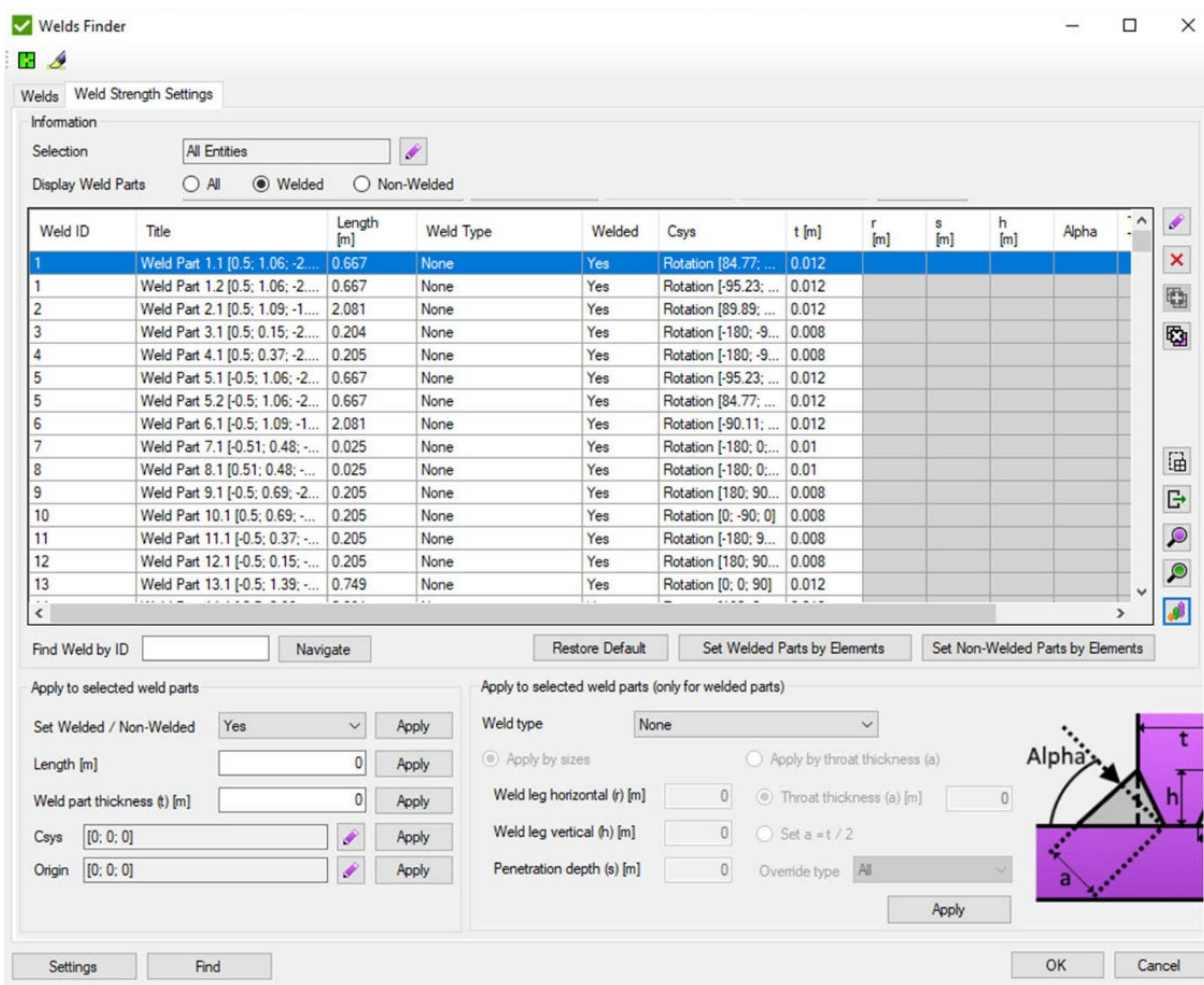


Obr. 24 Vložení SDC Verifier do Ansys Workbench. Převzato z [20].

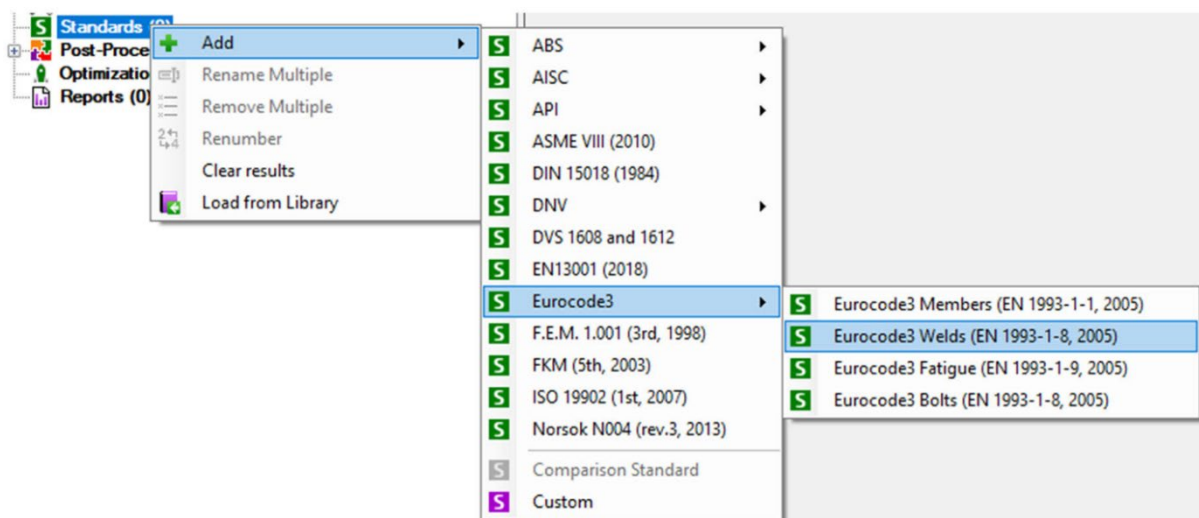
SDC WELD STRENGTH

SDC Weld Strength je jedno z rozšíření, které lze aplikovat v SDC Verifier. Roční licence tohoto rozšíření je v ANSYS App Storu dostupná za 1500 \$. V analýze pomocí SDC Weld Strength je nutné mít model geometrie svařované součásti předem vytvořený. Uživatel je provázen nastavováním identifikace a vlastností svarů (jejich pozice, délka, tloušťka, materiálové charakteristiky apod.) dle obr. 25. Po kliknutí na tlačítko „Find“ je model svařované konstrukce automaticky prozkoumán a identifikované svary jsou následně přidány do databáze a označeny vlastním ID. Pro přehlednost lze v modelu barevně rozlišit ne/svařené části modelu. Požadovaný standard hodnocení svarových spojů je volen z možností v hlavičce analýzy dle obr. 26. Podle potřeb je možné upravit korekční faktory daného standardu.

Zatížení může být definováno klasickým způsobem v Ansys Workbench. Rozšíření SDC Verifier ale obsahuje předdefinované kombinace zatížení pro řešené analýzy. Bez nutnosti zadávání modul automaticky vypočítá vlivy základních typů zatížení. Mezi jednotlivé příklady zatížení nabízených programem patří zatížení větrem, bouří, zemětřesením, sněhem, pohyblivá zatížení, zdvihací zatížení atd. Dohromady program nabízí možnost až 1000 zátěžových kombinací. Pro každý typ lze definovat faktory bezpečnosti. Z těchto vlivů se dá vytvořit zatěžovací obálky, na jejichž základě jsou následně zjištěny napětí, posuvy, síly atp. V závěru výpočtu SDC Verifier nabízí možnost vytvoření zprávy pro dokumentaci vypočtené analýzy.



Obr. 25 Vyhledávač svarů v rozšíření SDC Weld Strength. Převzato z [20].



Obr. 26 Volba standardu pro hodnocení analýzy. Převzato z [20].

ZHODNOCENÍ MODULU SDC VERIFIER A ROZŠÍŘENÍ WELD STRENGTH

Modul SDC Verifier je dostupný zdarma ke stažení a slouží k umístění požadovaných rozšíření do Ansys Workbench.

Rozšíření Weld Strength slouží k analýze pevnosti svařovaných konstrukcí. Mezi jeho hlavní funkce patří identifikace svarů v modelu konstrukce a následné definování zatěžovacích stavů. Vzhledem k možnostem nastavení specifických zátěžových podmínek tohoto rozšíření je možné jeho využití pro výpočty především svařovaných konstrukcí, jako jsou jeřáby apod. K těmto analýzám rozšíření nabízí hodnocení pomocí standardů a doporučení. Rozšíření Weld Strength je dostupné v ANSYS App Storu za 1500 \$.

Kromě rozšíření Weld Strength je možné dokoupení dalších rozšíření do modulu SDC Verifier. Patří mezi ně [19]:

- SDC Fatigue (analýza únavového chování konstrukcí) za 1500 \$ na rok
- SDC Eurocode3 (aplikace Eurokódu 3 [10] do výpočtu analýzy) za 1250 \$ na rok
- SDC Reporting (generování zprávy z řešené analýzy) za 800 \$ na rok

5 SIMUFACT

5.1 O SPOLEČNOSTI

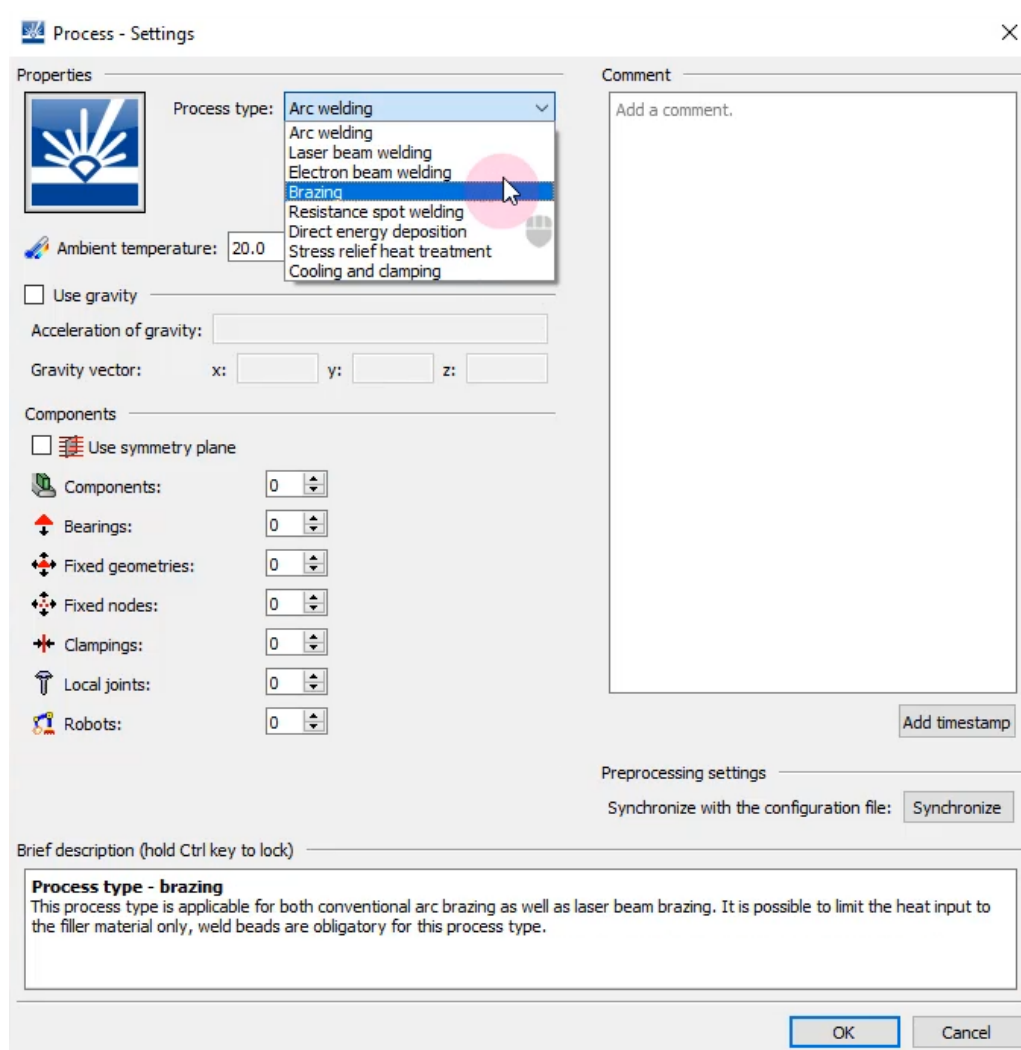
Firma MSC Software byla založena roku 1963 v Hamburku v Německu. Zabývala se návrhem a optimalizací výrobních procesů. V průběhu následujících let firma uzavřela partnerství s mnoha dalšími partnery. V roce 2017 byly firmy MSC Software a další zakoupeny švédskou společností Hexagon. Nynější společnost udává rok 2006 jako počátek vývoje simulačního softwaru Simufact Welding pro analýzy procesů svařování, který následně roku 2010 vydala. Kromě Simufact Welding společnost nabízí také Simufact Forming pro simulaci technologie tváření a Simufact Additive pro simulaci 3D tisku a rapid prototyping. Aktuálně zaměstnává okolo 200 lidí. Společnost spolupracuje s výrobcí automobilů jako jsou BMW, Audi, Volkswagen, Porsche nebo Mercedes-Benz. Společnost nabízí velké množství výukových programů, webinářů a také studentské softwaru zdarma [14], [21]. Následující podkapitoly jsou z velké části inspirovány [14].

5.2 SIMUFACT WELDING

Simufact Welding umožňuje modelování procesu svařování elastoplastického materiálu. Software zahrnuje řešení strukturální analýzy (zbytková napětí, deformace apod.) závislé na termálních (přechodná teplotní pole) a materiálových (fázové transformace) vlastnostech. Software se chlubí možným snížením deformací a větší prostorovou stabilitou díky optimalizaci polohy upínání konstrukce nebo také možností simulace více svařovacích procesů zároveň. Umožňuje modelování obloukového a laserového svařování, dále také svařování svazkem elektronů nebo tvrdé pájení. Analýzy je možné řešit různými způsoby od zanedbání fázových přeměn až po analýzy zohledňující všechny potřebné aspekty, ty však s sebou přináší delší výpočetní dobu. Kromě samotného procesu svařování je možná analýza následných tepelných úprav. Simufact Welding je zaměřený výhradně na průběh procesu svařování, následné zatěžování svařence je nutné ověřit jinými metodami. Při řešení procesu svařování lze v softwaru užít následující algoritmus.

5.2.1 VYTVOŘENÍ SVAŘOVACÍHO PROCESU

V okně zobrazeném na obr. 27 se nastavuje metoda svařování, teplota okolí, možné zohlednění tíhového zrychlení a počet komponent jako jsou svářecí roboti apod.



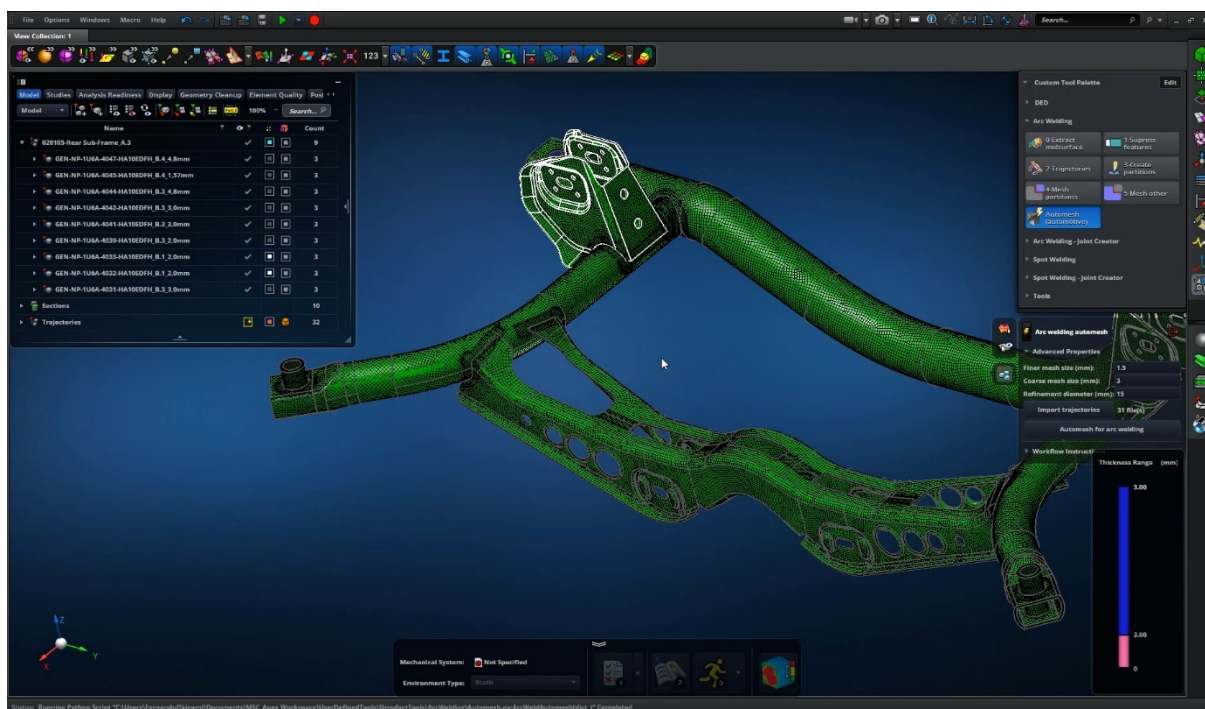
Obr. 27 Nastavení procesu svařování. Převzato z [14].

5.2.2 GEOMETRIE A SÍŤ KONEČNÝCH PRVKŮ

V softwaru je možné vytvořit základní geometrie. Pro zadání složitějších útvarů nebo k tvorbě sítě konečných prvků lze použít externí programy. Simufact doporučuje MSC Apex Modeler. K dalším úpravám geometrie je v softwaru intuitivní nastavování vzájemných poloh jednotlivých těles.

MSC APEX MODELER

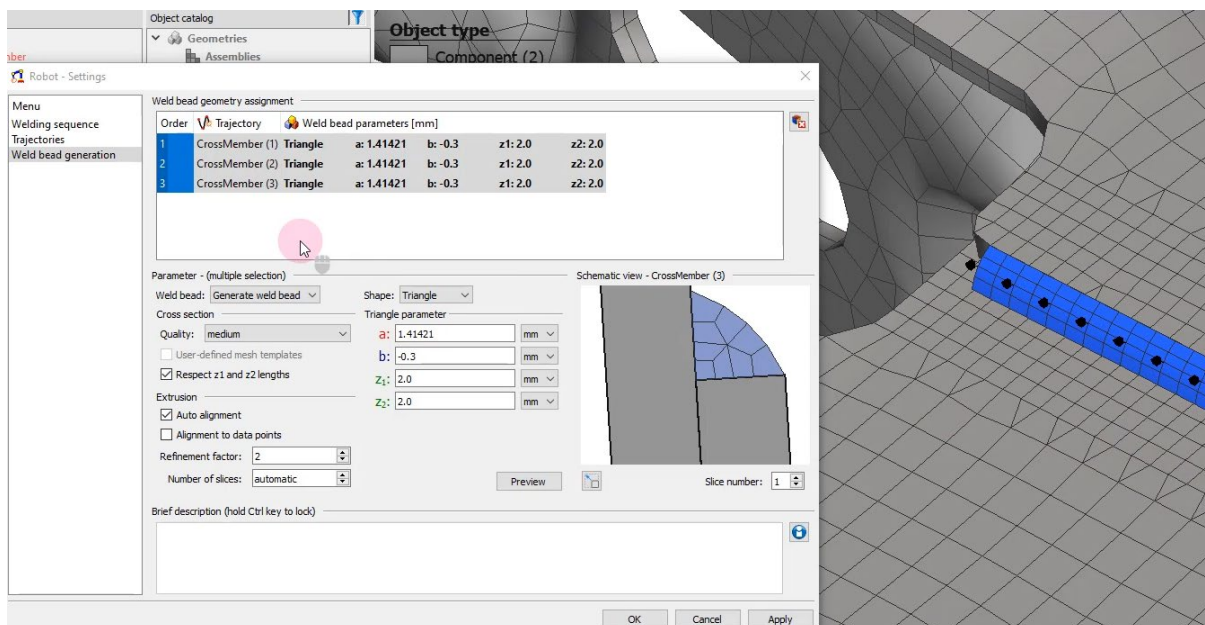
Jedná se o nástroj na modelování a tvorbu sítě konečných prvků vyvíjený firmou MSC Software. Práce mezi nástroji MSC Apex Modeler a Simufact Welding je propojena, model se tak dá v průběhu řešení aktualizovat. Na obr. 28 je zobrazena vytvořená síť konečných prvků v MSC Apex Modeler.



Obr. 28 Tvorba modelu a síť konečných prvků v MSC Apex. Převzato z [14].

5.2.3 SVAROVÉ TRAJEKTORIE

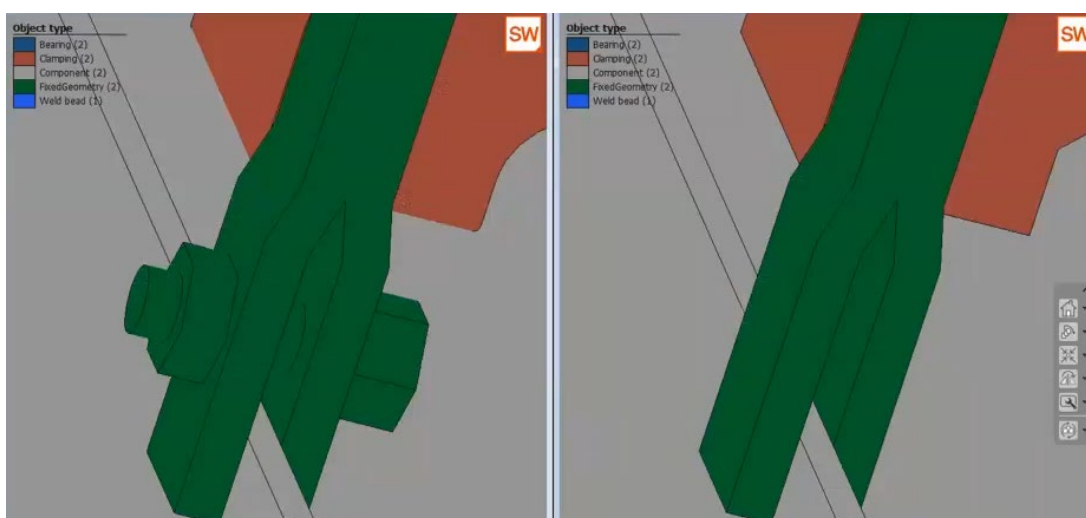
V této části se zadávají křivky, po kterých se pohybují svařovací roboti a vytváří svařové housenky. Křivka svařové housenky může být zadána manuálně nebo importováním dat v tabulce či G kódu (programovací jazyk pro CNC). Na obr. 29 je zobrazeno nastavení svařových spojů. V dalších krocích jsou definována data jako rychlost svařování aj.



Obr. 29 Nastavení trajektorie svařových spojů. Převzato z [14].

5.2.4 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

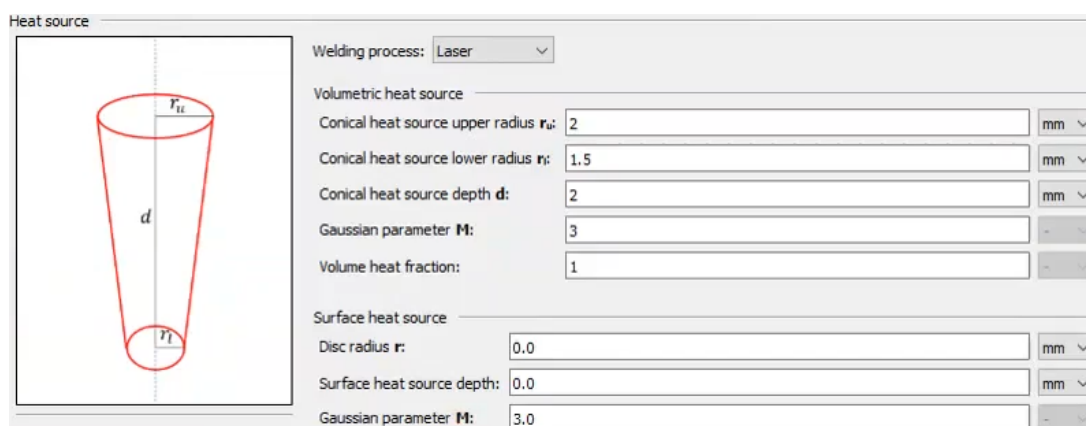
Jako okrajové podmínky lze využít upevňovací nástroje. Dle možností softwaru výrobce udává, že na definování upevnění stačí jednoduché tvary (v pravé části obr. 30) kvůli snížení náročnosti výpočtu, protože zanedbaný detail konečný výsledek příliš neovlivní. Hlavní roli hraje především oblast kontaktu konstrukce s upevněním, která by měla být přesná. Software zohledňuje upínací síly a tuhost v místech upevnění. Na obr. 30 jsou zobrazena ručně vymodelovaná upevnění, software umožňuje také automatické přidání upevňovacích nástrojů. Upevnění konstrukce je možné libovolně přidávat a odebírat v časové závislosti během svařování.



Obr. 30 Zjednodušení upevňovacích nástrojů. Převzato z [14].

5.2.5 TEPELNÝ ZDROJ

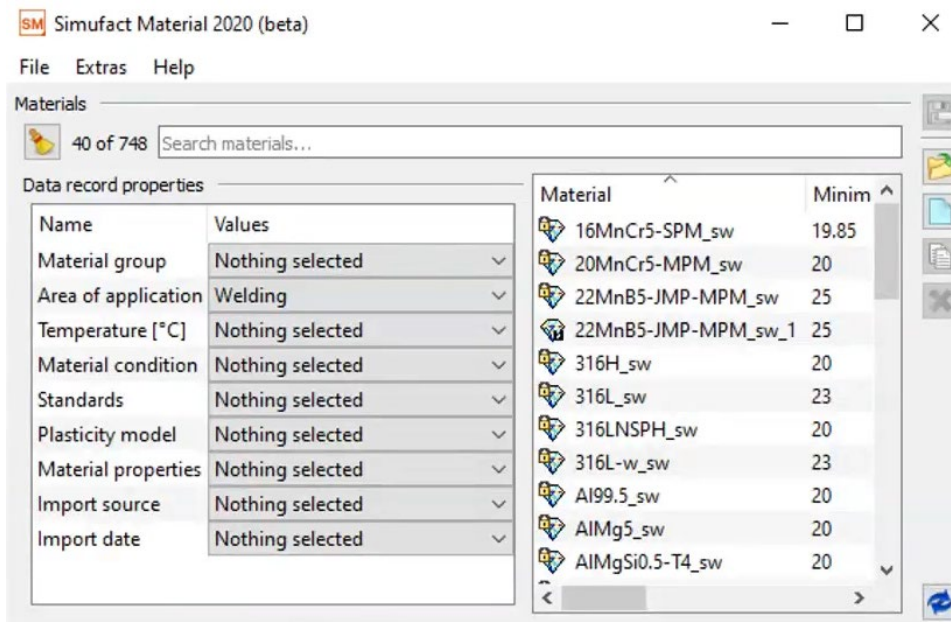
V tomto kroku je zadána metoda svařování, podle níž je softwarem nadefinován ekvivalentní tvar tepelného zdroje, u kterého se následně určují rozměry, síla proudu a další viz obr. 31. Software nabízí od nové verze (2021) přesnější zohlednění tepelného zdroje díky empirickým datům. Při výpočtu vyhodnocuje kvalitu svaru v závislosti na TOO.



Obr. 31 Definice tepelného zdroje podle metody svařování. Převzato z [14].

5.2.6 MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI

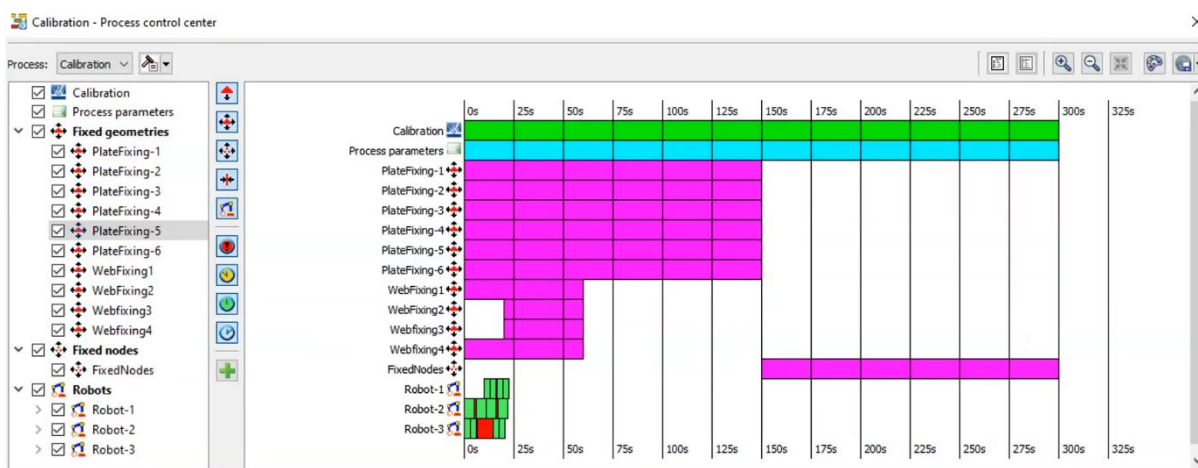
Materiály lze volit ze softwarové databáze a případně doplnit jejich vlastnosti dle okna na obr. 32.



Obr. 32 Nastavení materiálových vlastností. Převzato z [14].

5.2.7 ČASOVÝ SLED PROCESŮ

Pro větší přehlednost lze zobrazit sled událostí během svařovacího procesu viz obr. 33. Toto okno obsahuje časovou závislost využití jednotlivých svařecích robotů, upevňovacích nástrojů, chlazení atd.

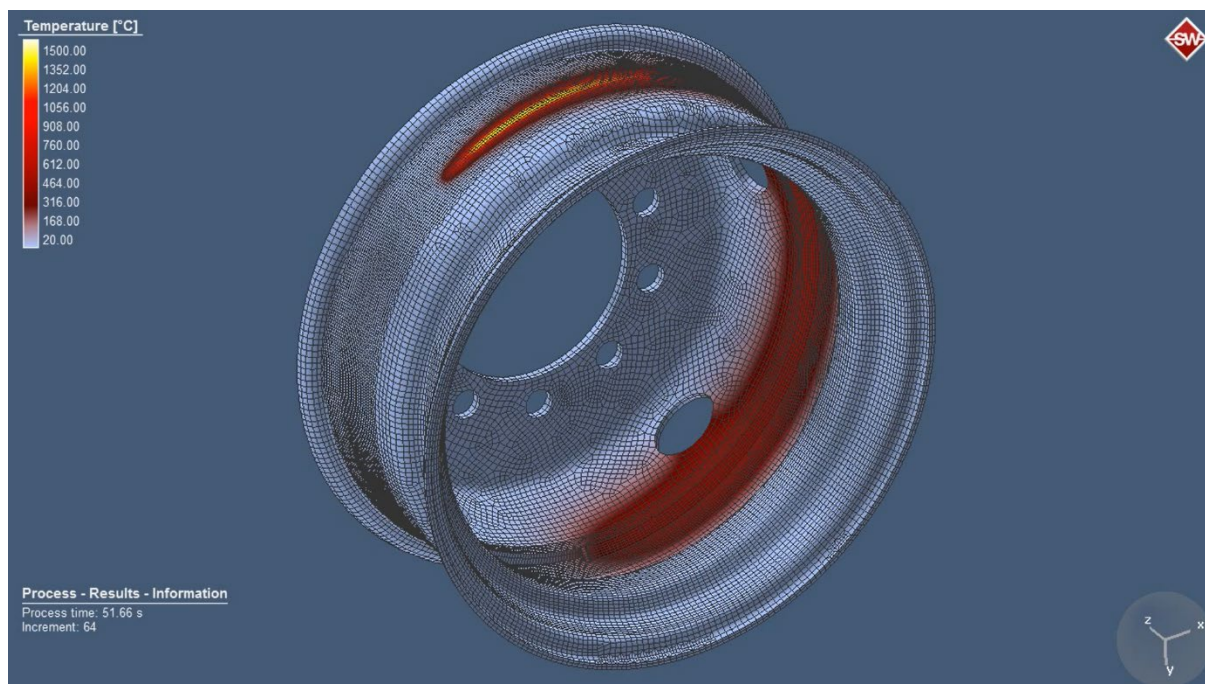


Obr. 33 Časový sled procesů během svařování. Převzato z [14].

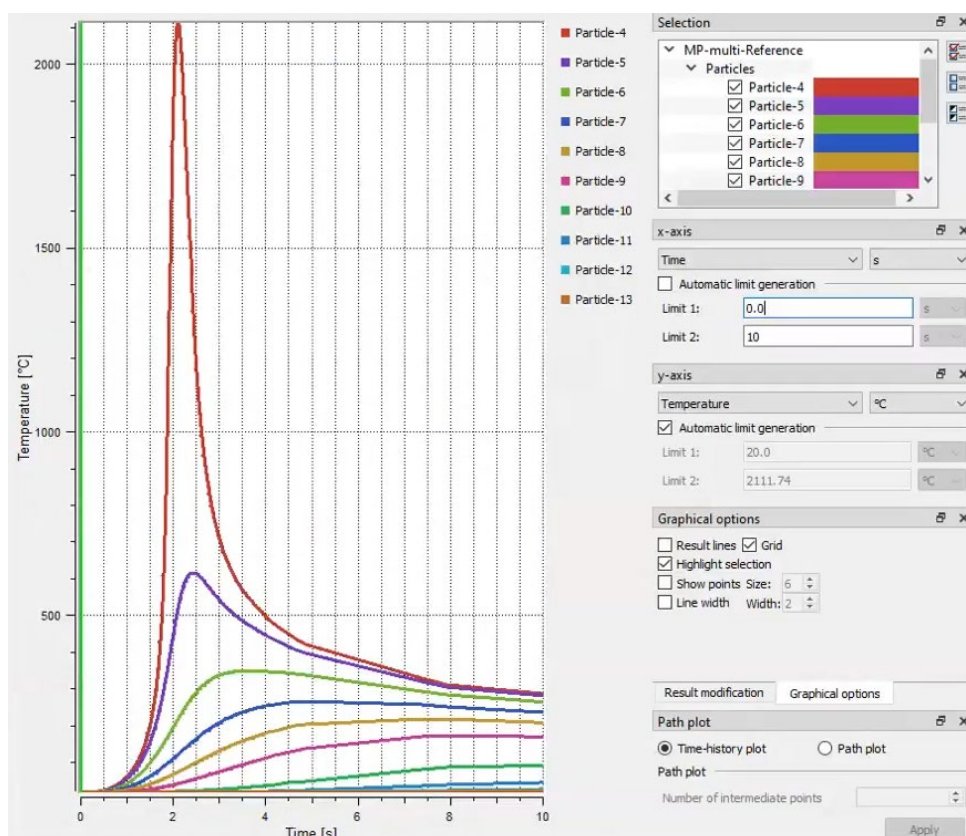
5.2.8 POST-PROCESSING A OPTIMALIZACE VÝSLEDKŮ

Software umožňuje zobrazení výsledků analýz v časových závislostech viz obr. 34. Výsledky analýzy lze exportovat do CSV souboru pro využití v další analýze či jiném softwaru. Je možné

je také zobrazit v grafech obdobně, jako tomu je na obr. 35, kde je zobrazena teplotní závislost na čase pro jednotlivé části konstrukce. Dále je zde také možnost vykreslit časovou závislost posuvů reakčních sil upevňovacích nástrojů dle obr. 36. Pro optimalizaci výsledků svařování je možné rozdělit svařování na několik procesů, změnit směry svařování nebo použít jiný počet svářecích robotů. Je také možné nastavit předepnutí součástí, aby se omezily její posuvy v daném směru při výrobě. Pomocí těchto úprav se dá mimo jiné docílit také využití optimálního počtu nástrojů na upevnění, který také ovlivňuje náročnost a cenu výroby.



Obr. 34 Výsledek teplotní závislosti na čase během procesu svařování. Převzato z [14].



Obr. 35 Závislost teploty na čase pro různé části konstrukce. Převzato z [14].



Obr. 36 Závislost posuvů reakčních sil upevňovacích nástrojů na čase. Převzato z [14].

5.2.9 PŘÍDAVNÉ MODULY

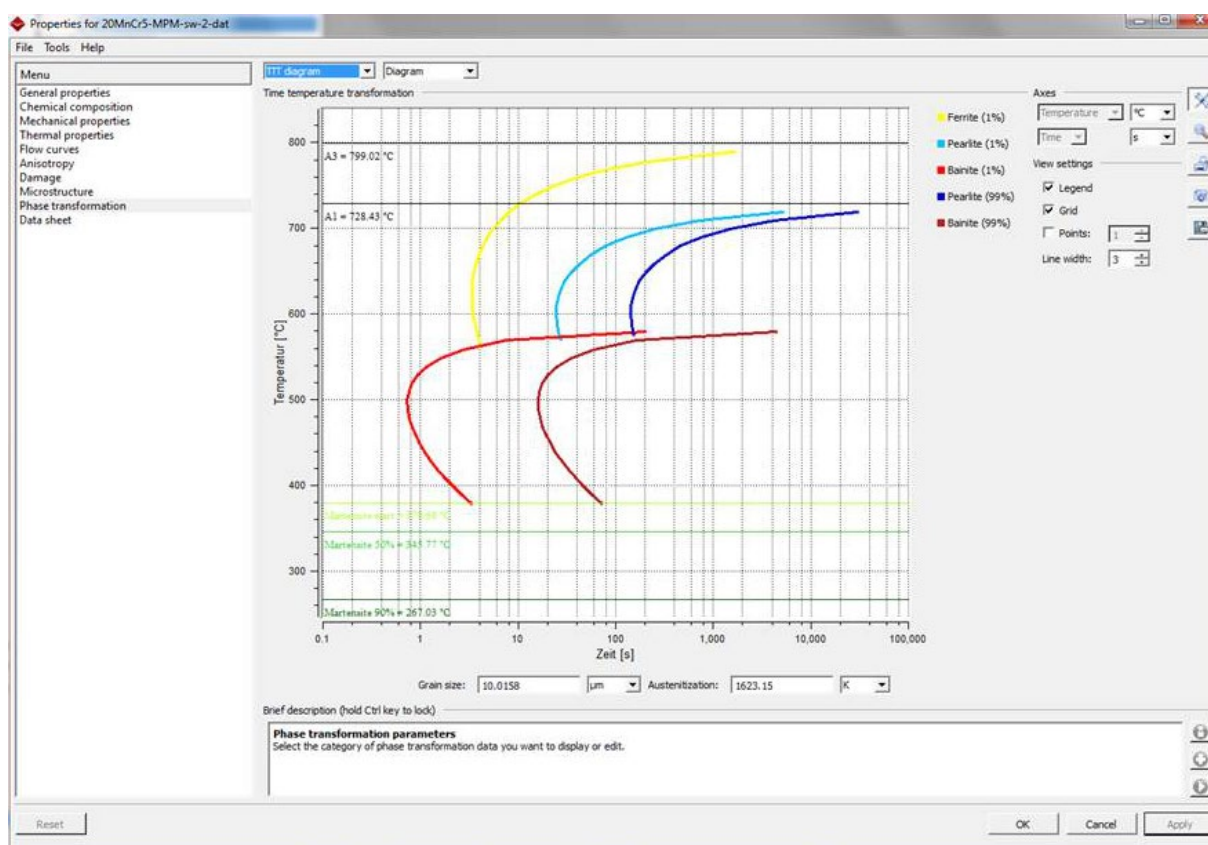
Simufact Welding nabízí moduly pro přesnější řešení. Kromě modulů pro specifitější zadávání parametrů metod svařování jsou zde také skupiny modulů rozdělené na moduly pro zvýšení výkonu, materiálové údaje a pokročilé materiálové modely.

JMATPRO® MATERIÁLOVÉ ÚDAJE

Kromě materiálové databáze obsažené v Simufact Welding je možné dokoupení licencí umožňující výpočty materiálových vlastností zahrnující slitiny niklu, titanu, mědi, austenitické a nízkolegované oceli.

POKROČILÉ MATERIÁLOVÉ MODELY

Tento modul je v softwaru nezbytný pro výpočet analýzy se zahrnutím fázových transformací materiálu. Během chlazení se fázové transformace počítají na základě IRA diagramů. V každém kroku výpočtu se uvažuje zbývající podíl austenitu v součásti a čas do další úrovně teploty. V řešení je uvažována vzniklá plasticita v průběhu mikrostrukturálních změn. Zobrazení materiálových vlastností v modulu je na obr. 37.



Obr. 37 Materiálové vlastnosti definované ARA diagramem. Převzato z [14].

5.2.10 ZHODNOCENÍ SOFTWARE

Simufact Welding je specializovaný software pro analýzy procesů svařování. Výpočty v tomto softwaru jsou vytvořené na míru pro svařovací linky. Software umožňuje nastavení různých parametrů, které svařování obnáší. Velkou výhodou je zahrnutí fázových přeměn do výpočtů. Společnost nabízí výukové webináře dostupné online a také studentské verze softwaru.

6 ABAQUS

6.1 DASSAULT SYSTÈMES

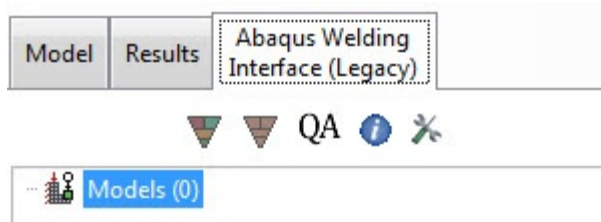
První verze Abaqusu byla zveřejněna roku 1978 firmou Simulia, která je nyní součástí francouzské softwarové společnosti Dassault Systèmes známou např. softwarem Catia nebo Solidworks. Mimo jiné společnost vyvíjí platformu 3DEXperience, která slouží k propojení programů na 3D modelování a programů na následné analýzy. Společnost má velký zájem o podporu studentů. Nabízí různé výukové programy a software pro studenty zdarma.

6.2 SOFTWARE ABAQUS

Jedná se o multifyzikální software s velkým využitím nejen v automobilovém průmyslu. Během vývoje byly vydány různé typy řešičů a sice Abaqus Standard, Abaqus Explicit, Abaqus CAE apod. Abaqus Standard je vhodný pro řešení strukturálních nebo pomalých dynamických analýz, zatímco Abaqus Explicit je vhodný pro dynamické děje. Analýzy mezi nimi je možné exportovat a různě rozšiřovat. Abaqus CAE je samostatné rozhraní zahrnující řešení těchto problematik. Abaqus umožňuje uživatelům vytvářet různá rozšíření softwaru. Na stránkách společnosti [15] jsou rozšíření Abaqusu dostupná v sekci Abaqus Add-ons.

6.3 ABAQUS WELDING INTERFACE (AWI)

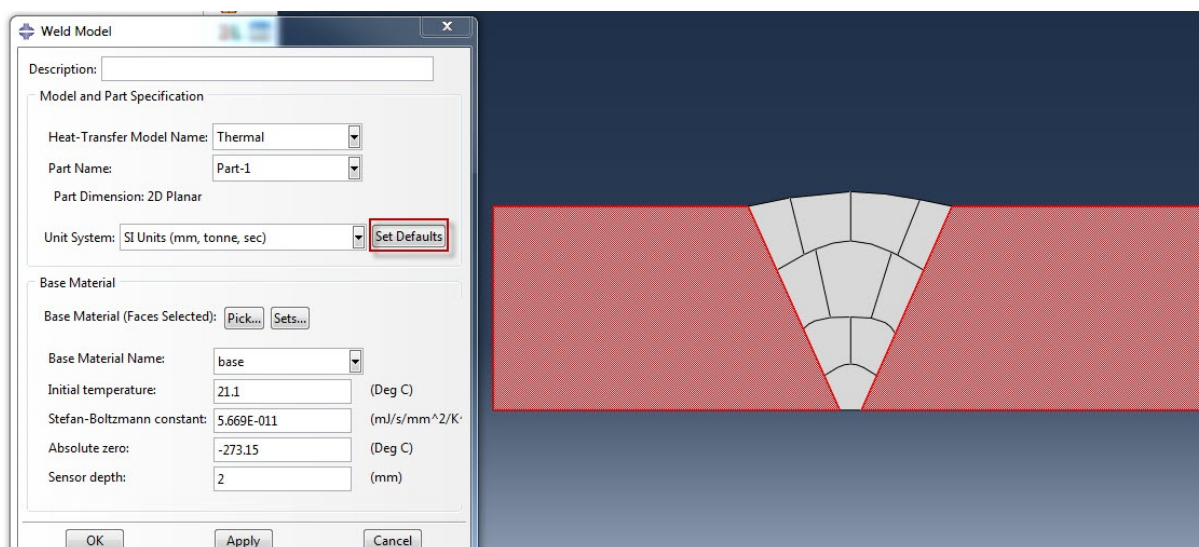
Jedná se o rozšíření programu Abaqus CAE vyvíjené firmou Simulia. Rozšíření je vhodné k automatizaci modelování a analýzy procesu svařování, které je v softwaru jinak složitější. Software je k dispozici ke stažení zdarma na stránkách výrobce [15]. Základem řešení je provedení termální analýzy, ze které software vyvodí následně výsledky analýzy strukturální. Analýzu je možné provést pro 3D i 2D součásti s tím, že geometrie musí být předem vymodelována. Rozšíření se do prostředí Abaqus přidává v položce „Plug-ins“. Po přidání se zobrazí nová lišta „Abaqus Welding Interface“, dle obr. 38, obsahující uživatelský manuál, nastavení barevného rozlišení částí svaru, položku QA tests obsahující příklady postupů při řešení základních svařovacích procesů a strom příkazů začínající položkou „Models“. Popis tohoto rozšíření je inspirován [15], [22].



Obr. 38 Lišta Abaqus Welding Interface.
Převzato z [22].

6.3.1 TVORBA MODELU

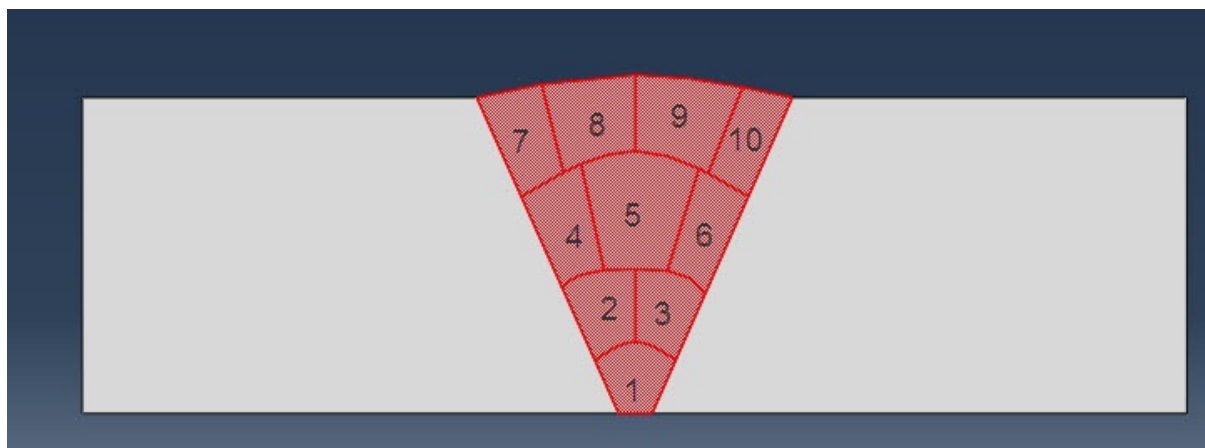
Jak již bylo zmíněno, model svařence je dopředu vytvořený a zároveň platí, že základní a přídatný materiál netvoří jeden díl součásti. Pomocí položky „Weld Model“ se definuje základní materiál svařence spolu s používanými jednotkami (SI apod.), počáteční teplota a další parametry dle obr. 39. Po aktivaci údajů se vytvořený model objeví ve stromu příkazů.



Obr. 39 Definování základního materiálu. Převzato z [22].

6.3.2 DEFINOVÁNÍ SVARŮ

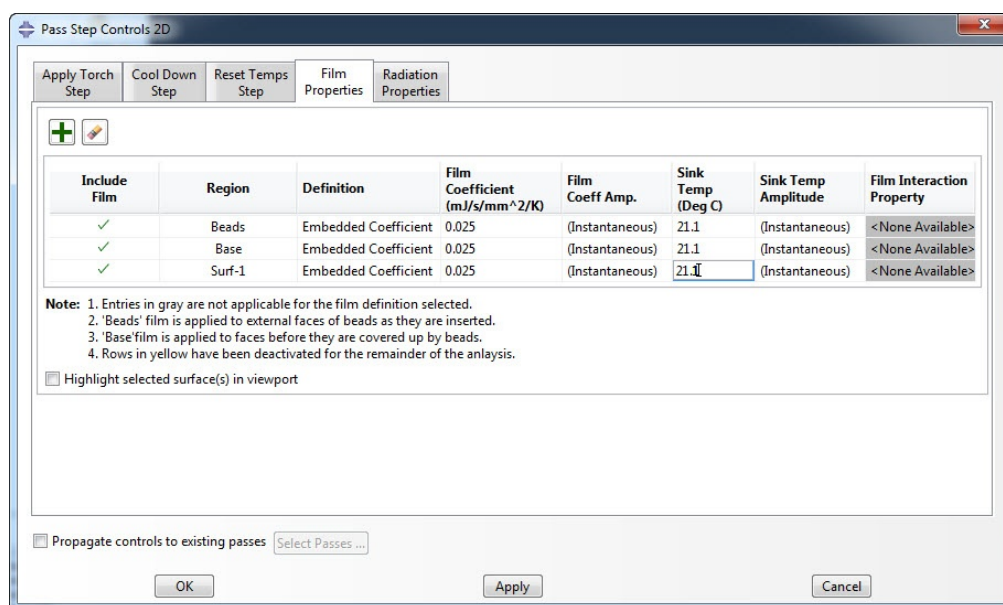
Díky modelu základního materiálu, vytvořeném v předchozím kroku, lze definovat vlastnosti svarů. Klíčovými vlastnostmi tohoto kroku je zadání počáteční teploty taveniny (svarové lázně) a cílové teploty v požadované hloubce součásti. Následně jsou určeny stěny svarové housenky v pořadí, v jakém jsou vrstveny během svařování dle obr. 40.



Obr. 40 Určení pořadí svarových vrstev dle procesu svařování. Převzato z [22].

6.3.3 DEFINICE PRŮBĚHU SVAŘOVÁNÍ

Zde se nastavují vlastnosti jednotlivých kroků v průběhu ohřívání a chlazení součásti. Položka „Apply Torch Step“ udává pohyb tepelného zdroje v závislosti na prostupnosti teploty součásti. Pokud je součást v definované tloušťce ohřáta na cílovou teplotu zadanou v minulém kroku, tepelný zdroj se posouvá dál. Položka „Cool Down Step“ funguje na stejném principu (opět podle teploty v dané tloušťce), ale při ochlazování. Je také možné nastavit, aby se další svar začal vytvářet až po ochlazení předchozí svarové housenky a v poslední řadě se zadávají koeficienty prostupu tepla a emisivity součástí. Toto nastavení je zobrazeno na . Dále je možné seřadit jednotlivé vrstvy svarové housenky dle časového sledu svařování.



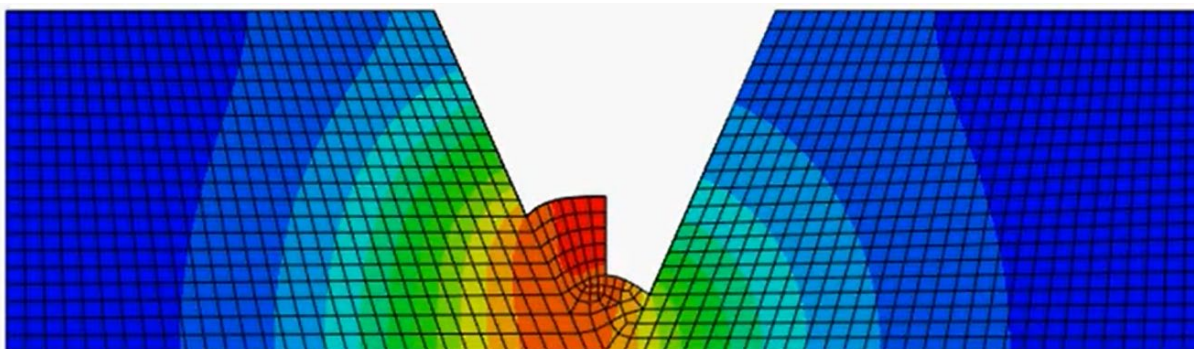
Obr. 41 Nastavení průběhu svařování. Převzato z [22].

6.3.4 OVLÁDACÍ PRVKY PRŮBĚHU SVAŘOVÁNÍ

Následuje určení závislosti termální analýzy na strukturální. V této sekci lze nastavit, v jaké části svařování budou prvky svarové housenky ne/aktivní. Kdyby byly svary celou dobu aktivní, mohlo by to mít negativní dopad na výpočet (vznik nereálných deformací). Proto je třeba, aby se prvky svaru zaktivovaly až v odpovídající poloze tepelného zdroje. Rozšíření nastavuje okrajové podmínky pro každý krok svařování v závislosti na ne/aktivovaných prvcích a zadaných teplotách. Po dokončení veškerého nastavení jsou možné zpětné úpravy jako např. nastavení směru a vrstvení svarů.

6.3.5 POST-PROCESSING

Výsledky termální a strukturální analýzy jsou zobrazovány v časové závislosti viz obr. 42.



Obr. 42 Ukázka výsledku termální analýzy s postupnou aktivací prvků. Převzato z [22].

6.3.6 ZHODNOCENÍ ROZŠÍŘENÍ

Toto rozšíření je vhodné pro analýzu procesu svařování, při které software využívá ohřívání jednotlivých částí svaru, ze kterých ve výsledku vytvoří tepelný průběh a na jeho základě i průběh napětí. Při popisu rozšíření bylo užito 2D modelů, rozšíření poskytuje řešení i ve 3D. Výrobce ve svém webinaru oznámil, že v budoucnu bude AWI obsahovat možnost řešení TOO.

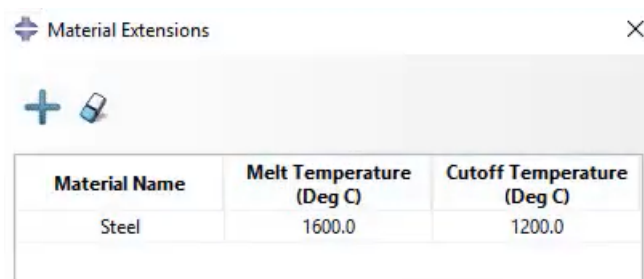
Zatím je tato funkce však není dostupná. Vlastnosti tohoto rozšíření jsou podobné nástroji Welding Distortion Wizard v softwaru Ansys Workbench z kapitoly 4.4.1. Rozšíření je možné stáhnout zdarma na stránkách výrobce [15] pro Abaqus z roku 2017.

6.4 QUSTOMWELD

Jedná se o rozšíření softwaru Abaqus o analýzu procesu svařování. Rozšíření je vyvíjeno firmou Qustom Apps. Pro aplikaci tohoto rozšíření je také potřeba mít předem vymodelovaný svařenec. Průběh nastavování analýzy je popsán níže. Celá kapitola je inspirována z [23].

6.4.1 NASTAVENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ

V tomto nastavení jsou zadávány použité materiály a také jejich teplota tání (Melt Temperature) a hraniční teplota (Cutoff Temperature), pod níž nebude teplota způsobovat napětí v součásti viz obr. 43.



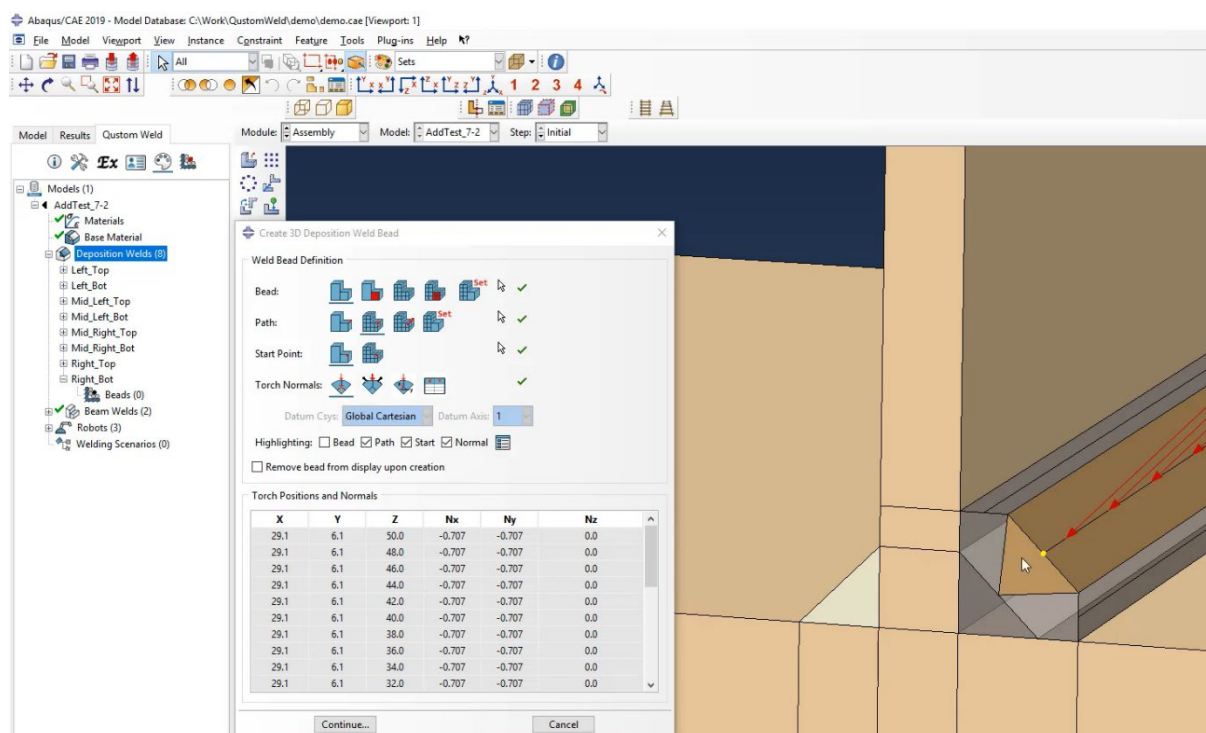
Obr. 43 Nastavení materiálových vlastností.
Převzato z [23].

6.4.2 DEFINOVÁNÍ ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU

V této sekci je definována geometrie základního materiálu a k ní jsou přiřazeny materiálové vlastnosti. Následně je možné nastavit typy prvků pro přenos tepla nebo napětový model.

6.4.3 DEFINOVÁNÍ SVARU

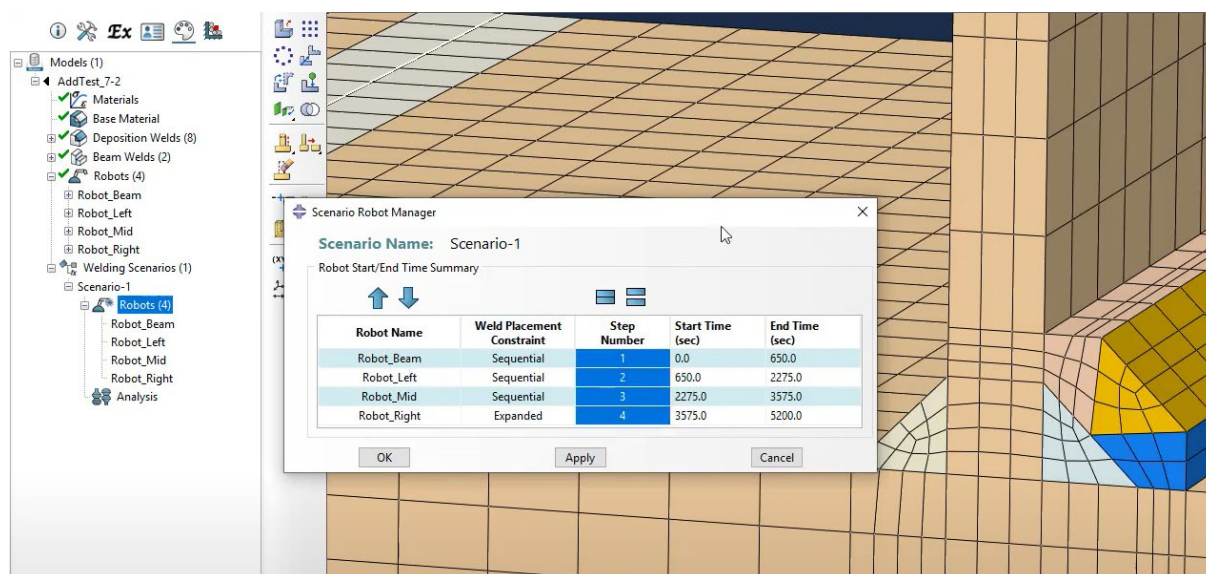
Při definování této položky je potřeba zadat materiál svaru, teplotu okolí a případně i koeficient prostupu tepla a emisivitu svarového materiálu. Následně je určena geometrie svaru, směr svařování a pod jakým úhlem bude aplikován tepelný zdroj viz obr. 44.



Obr. 44 Nastavení vlastností svarové housenky. Převzato z [23].

6.4.4 NASTAVENÍ SVAŘOVACÍCH ROBOTŮ

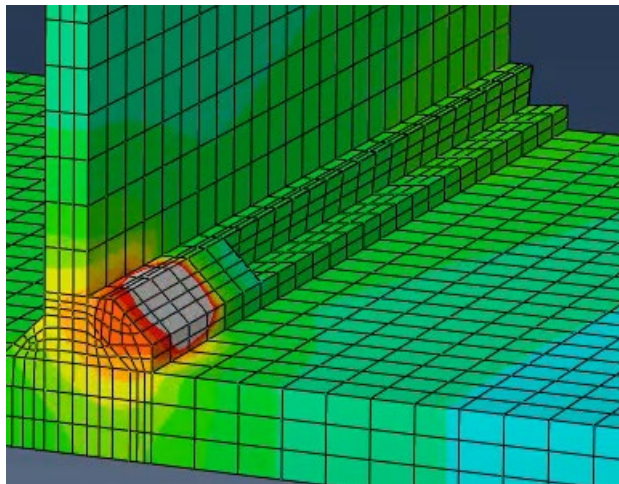
Nyní je potřeba určit, jak budou jednotlivé svarové housenky přidávány. V tomto kroku je určena rychlost tepelných zdrojů, jejich tvar, napětí atd. Následuje nastavení časového sledu svařování, které lze pro jednotlivé roboty určit viz obr. 45. Dále je možné nastavit cílovou teplotu chlazení, což může urychlit výpočet analýzy.



Obr. 45 Nastavení časového sledu svařování. Převzato z [23].

6.4.5 POST-PROCESSING

V závěru lze zobrazit výsledky v časové závislosti. Na obr. 46 je zobrazen výsledek termální analýzy.



Obr. 46 Výsledek termální analýzy procesu svařování. Převzato z [23].

6.4.6 ZHODNOCENÍ ROZŠÍŘENÍ

Toto rozšíření nabízí modifikaci softwaru Abaqus, jinak zaměřeného na řešení všeobecných analýz, pro urychlení a v rámci možností softwaru co nejpřesnější řešení svařovacího procesu. Funkce QustomWeld je stejná jako u AWI, tedy automatizace řešení procesu svařování. QustomWeld nejprve vypočte termální analýzu, na základě které jsou odvozeny i výsledky strukturální analýzy. Přístup k řešení analýzy svařování tohoto softwaru je podobný řešení pomocí nástroje Welding Distortion Wizard v softwaru Ansys Workbench z kapitoly 4.4.1 (automatizace tvorby MKP modelu svařovacího procesu bez zahrnutí fázových přeměn). Předplatné roční licence tohoto rozšíření činí 7500 \$. Aktuálně jsou dostupné verze pro Abaqus 2020 a 2021. Výrobce udává, že oproti AWI jsou výpočty pomocí tohoto rozšíření mnohokrát rychlejší a umožňují více funkcí, jakožto nastavení tepelných zdrojů, robotů apod.

7 SYSWELD

7.1 ESI GROUP

Společnost ESI (Engineering Systems International) Group byla založena roku 1973 Alainem de Rouvarayem ve Francii v Paříži. Později se kvůli poptávce o analýzy bezpečnosti a deformací z automobilového průmyslu rozšířila také do Německa. Nyní působí především v automobilovém průmyslu, ale také v průmyslu letectví, obrany, námořnictví a energetickém průmyslu. Společnost sice nenabízí studentské verze softwaru, jsou však možné individuální spolupráce po domluvě. Aktuálně společnost zaměstnává okolo 1200 lidí ve více než 20 zemích po celém světě [16].

7.2 PROGRAM SYSWELD

SYSWELD je software určený pro kompletní analýzu tepelného zpracování a mechanické analýzy (statické, cyklické namáhání). Software podporuje posouzení materiálových vlastností, mikrostruktury, zbytkového napětí a deformace ve svařovaných konstrukcích. Zabývá se nejen svařovacími procesy (elektrickým obloukem, svazkem elektronů, laserové a bodové svařování, třením – bez přídavného materiálu), ale také jinými procesy tepelného zpracování (kalení, nitridace). Software podporuje jevy doprovázející svařování (tepelné, chemické, metalurgické a mechanické) a dovoluje uživateli přenášet výsledky předchozí výrobní fáze do další. Před výpočtem je možné zadat následující parametry [6]:

- Tvorba geometrie – Je možné vložit geometrii z Catia, CAD softwarů, Ansys, formáty „.step“ apod.
- Určení chemického složení základního a přídavného materiálu, definice zvolené technologie svařování
- Definice přívodu tepla (proud, napětí elektrického oblouku, rychlost svařování).
- Sled svařovaných ploch a možnost vícevrstvého svařování.
- Teplota předehřevu a teplota dílčích operací
- Možnost zadání tepelného zpracování po svařování
- Způsob upevnění svařence při procesu svařování

Ve výsledku analýz, vypočteném pomocí empirických vztahů, lze zobrazit hodnoty teplotních polí a gradientů, rozložení metalurgických fází napříč geometrií (software podporuje fáze ocelí, slitin hliníku a titanu), rozložení tvrdosti a velikost zrn. Dále také software zobrazí rozložení vnitřních napětí, plastická přetvoření a stanoví přechodné materiálové vlastnosti jakožto meze kluzu a pevnosti. Podle zamýšleného cíle výpočtu lze typy simulací rozdělit na [6]:

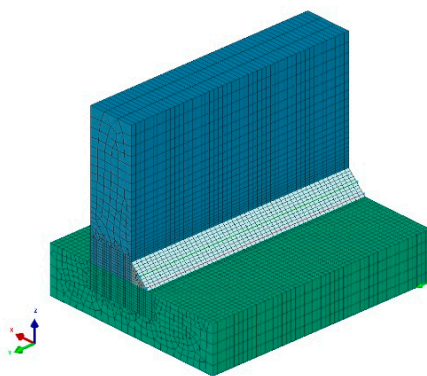
1. Analýza deformace – tento typ analýzy se zabývá především deformací součástí bez závislosti na vlivu struktury materiálu vnitřních napětí apod.
2. Analýza struktury materiálu – na základě rozložení tvrdosti a metalurgických fází v materiálu lze zjistit meze kluzu a pevnosti.
3. Analýza vnitřních napětí – v této analýze jde o porovnání rozložení napětí ve svařované součásti s výsledky pevnostních zkoušek prováděných pro jednotlivé metalurgické fáze.
4. Předpovězení kritických míst pro iniciaci trhlin – posouzení náchylnost k praskání svařovaných součástí se provádí pro iniciace trhlin za studena, za tepla nebo při vícevrstvě svařování
5. Analýza únavové životnosti svarového spoje – pomocí zatěžování součástí (tlakem, silou, tepelně) lze odhadnout životnost součástí.

6. Analýza návrhu upínání svařence během výroby – jedná se o optimalizační proces pro upnutí konstrukce v závislosti na napětí a deformacích.
7. Simulace opravného svařování – jedná se o detekci trhlin a následné navrhnutí ideální technologie pro spravení součásti.
8. Optimalizace procesu svařování – jedná se o proces porovnávání jednotlivých metod svařování na dané součásti.

Software SYSWELD obsahuje různé moduly pro zadávání daných parametrů a řešení různých analýz. Pro řešení průběhu svařování lze použít následující algoritmus použitý v [24].

7.2.1 VISUAL-MESH

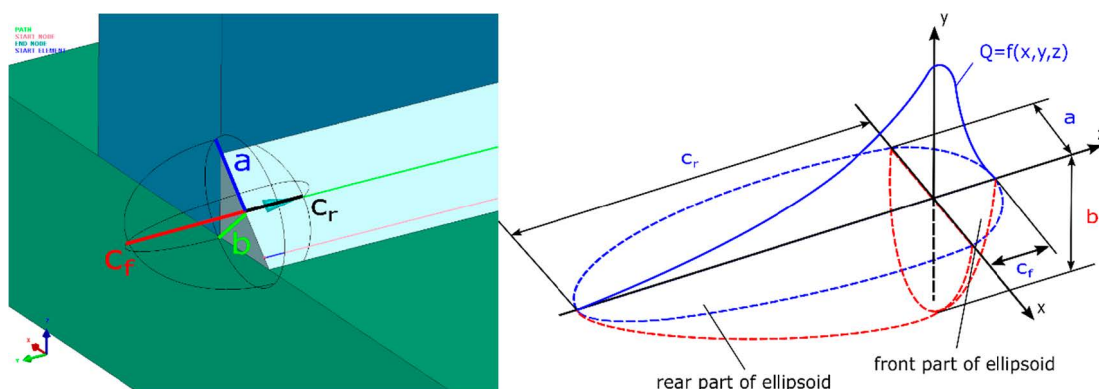
Zde se vytváří geometrie a síť konečných prvků viz obr. 47. Následně jsou definována místa ohřívání pohybujícím se zdrojem tepla a přenosem tepla v materiálu.



Obr. 47 Rozložení sítě konečných prvků ve svařenci. Převzato z [25].

7.2.2 WELDING ADVISOR

Tento modul slouží k zadávání vlastností definujících daný proces svařování (okrajové podmínky, charakter tepelného zdroje). U tepelného zdroje se zadává jeho tvar a rozměry viz obr. 48. Je u něj možné také definovat časový průběh teplot během svařování.



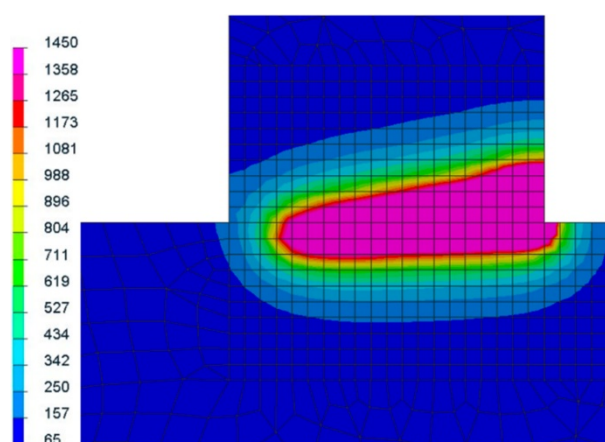
Obr. 48 Definování tepelného zdroje svařování. Převzato z [25].

7.2.3 VISUAL-WELD

V prostředí Visual-Weldu se zadávají trajektorie svařování pro tepelného zdroje a lokální souřadnicový systém. Pokud jsou jednotlivé části geometrie popsány vhodnými příponami dle manuálu, software automaticky rozpozná přídavný a základní materiál. Modul automaticky vybere odpovídající tepelný zdroj a přídavný materiál dle metody svařování. Pro přídavný materiál lze nastavit konkrétní prvky, do kterých bude proudit teplo ze zdroje. V modulu existuje materiálová databáze s daty teplotně a strukturálně závislými na materiálových vlastnostech. Pro tato data existují také ARA diagramy.

7.2.4 VISUAL-VIEWER

Zobrazení výsledků analýz je možné v tomto modulu. Na obr. 49 je zobrazen výsledek rozložení teploty při svařování.



Obr. 49 Výsledek termální analýzy svařence.
Převzato z [25].

7.2.5 ZHODNOCENÍ SOFTWARE

Vzhledem k tomu, že je SYSWELD specializovaný software pro danou problematiku, se zdá být jeho využití efektivní volbou pro řešení svarových spojů. Zvlášť je nutno podotknout jeho podporu fázových přeměn materiálů, které jsou charakteristické různorodými tvrdostmi. Tato skutečnost je velmi důležitá zvlášť u analýz složitějších konstrukcí. Na rozdíl od ostatních softwarů zde nejsou dostupné studentské licence.

8 SROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH SOFTWAREŮ PRO MODELOVÁNÍ SVAROVÝCH SPOJŮ

Dle zjištěných informací bylo vytvořeno srovnání softwarů pro modelování svarových spojů viz tab. 2 a došlo se k následujícímu závěru. Svarové spoje lze řešit i pomocí multifyzikálních, všeobecně zaměřených softwarů (ANSYS, ABAQUS). Bereme-li v potaz absenci podpory fázových transformací těchto softwarů, může to mít v některých případech nezanedbatelný dopad na řešení, zvláště u větších konstrukcí nebo při užití materiálu, u kterého má tepelné zpracování velký dopad na TOO. V [24] bylo ověřeno, že software Ansys výsledky některých analýz mírně podhodnotil oproti reálnému experimentu a oproti softwaru Sysweld trval výpočet mnohonásobně déle. Užití softwarů specializovaných pro řešení svarových spojů (SIMUFACT, SYSWELD) je na místě, pokud je uživatel zaměřen primárně na řešení svarových spojů. U těchto softwarů jsou pohromadě všechny funkce pro řešení této problematiky a nemusí se dohledávat externí doplňky pro zjištění požadovaných parametrů svarových spojů. Navíc mnohdy je jejich řešení analýz přesnější z důvodu zahrnutí více faktorů, které svarové spoje obnáší (fázové transformace atd.).

Tab. 2 Srovnání softwarů pro řešení svarových spojů.

	ANSYS	SIMUFACT	ABAQUS	SYSWELD
Rok založení	1970	1963	1978	1973
Původ	USA	Německo	Francie	Francie
Studentské licence	ANO	ANO	ANO	NE
Fázové transformace materiálu	NE	ANO	NE	ANO
Přesnost výpočtů svarů	****	*****	****	*****
Kompatibilita s jinými softwary	*****	*****	*****	*****
Dostupnost dat pro srovnání softwarů	****	*****	****	**

ZÁVĚR

V práci byly popsány různé metody výpočtů zatěžování svarových spojů a procesu svařování a typy nástrojů, které mohou být vhodným řešením, pro snížení výrobních nákladů svařovaných konstrukcí a automatizaci celého procesu analýzy. V současné době technologického růstu se zdá využití některých zmíněných metod i přes výši jejich cen vhodné. Díky výpočetnímu modelování se dá mnohonásobně snížit čas procesu výroby, náklady na výrobu a také docílit požadovaných vlastností výrobků. Dle průzkumu trhu a následného srovnání softwarů se došlo k závěru, že v poslední době vzniklo velké množství doplňků pro řešení svarových spojů, kterými lze rozšířit použitelnost všeobecných MKP softwarů jako jsou např. Ansys a Abaqus. Firmy mají často zájem o tyto softwary, zaměřené na všeobecné úlohy, protože se zabývají i jinými typy analýz než řešením svarových spojů a z finančních důvodů si specializovaný software navíc nemohou dovolit. Je také důležité zmínit, že ne všechna rozšíření, všeobecně zaměřených softwarů, jsou dostupná zdarma. Z pohledu řešení svarových spojů se zdá být použití softwarů specializovaných danou problematikou efektivnější volbou z důvodu mnohdy větší přesnosti a také větší rychlosti výpočtů.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ČSN 05 0000. *Zváranie. Zváranie kovov. Základné pojmy*. 1987.
- [2] ČSN 05 0120. *Výpočet svarových spojů strojních konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut, 1972.
- [3] XIAOGANG, Li. *A Review of Austenite Memory Effect in HAZ of B Containing 9% Cr Martensitic Heat Resistant Steel*. 2019. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/met9111233>
- [4] TADAVI, Tanvir. *Microscopic Analysis of Heat Affected Zone (HAZ) of Submerged Arc Welding (SAW) Joint for 1018 Mild Steel Sheet*. International Conference on Communication and Signal Processing, 2016.
- [5] HOBACHER, Adolf. *Recommendations for fatigue design of welded joints and components, IIW Collection, DOI 10.1007/978-3-319-23757-2_1*. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
- [6] KIK, Tomasz a Marek SLOVÁČEK. *Use of Welding Process Numerical Analyses as Technical Support in Industry: Introduction to Welding Process Numerical Simulations*. 2015. Dostupné z: doi:<http://dx.doi.org/10.17729/ebis.2015.4/3>
- [7] BARSOUM, Z. a I. BARSOUM. *Residual stress effects on fatigue life of welded structures using LEFM, Engineering Failure Analysis*. 2008.
- [8] DENG, Dean. *FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects: Materials & Design*. 2009.
- [9] AYGÜL, Mustafa. *Fatigue analysis of welded structures using the finite element method*. 2012. Gothenburg, Sweden, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2012.
- [10] ČSN EN 1993-1-9. *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-9: Únava*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [11] PETRUŠKA, Jindřich. *MKP v inženýrských výpočtech* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/images/opory/MKP%20v%20inzenyrskych%20vypoctech/RIV.pdf>
- [12] VRBKA, Martin a Michal VAVERKA. *Metoda konečných prvků. Konstruování strojních součástí* [online]. VUT FSI, Brno, Ústav konstruování [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: http://www.shigley.cz/images/texts/file/prednaska1_mkp.pdf
- [13] *Ansys, Inc.* [online]. [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/>

- [14] *Simufact Engineering* [online]. [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.simufact.com/>
- [15] *Dassault Systèmes* [online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <https://www.3ds.com/>
- [16] *ESI Group* [online]. [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.esi-group.com/>
- [17] HENK DEN BESTEN. *Fatigue damage criteria classification, modelling developments and trends for welded joints in marine structures: Ships and Offshore Structures* [online]. [cit. 2021-04-22].
- [18] MECSÉRI, B. a B. KÖVESDI. *Discussion on the Hot-Spot and Notch Stress Based Fatigue Assessment Methods Based on Test Results: International Journal of Steel Structures*. 2020. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s13296-020-00345-1>
- [19] *ANSYS Store* [online]. [cit. 2021-04-22].
- [20] *SDC Verifier* [online]. [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://sdcverifier.com/>
- [21] *MSC Software* [online]. [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://www.mscsoftware.com/>
- [22] *Simuleon* [online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://www.simuleon.com/>
- [23] *Qustom Apps* [online]. [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: www.qustomapps.com
- [24] KRAKOVSKÝ, Andrej. *Analýza způsobů modelování procesu svařování metodou konečných prvků*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Petr Vosynek, Ph.D.
- [25] KIK, Tomasz a Jacek GÓRKA. *Numerical Simulations of Laser and Hybrid S700MC T-Joint Welding*. 2019. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/ma12030516>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AWI		Abaqus Welding Interface
HAZ		Heat affected zone
IIW		International institute of welding
MKP		Metoda konečných prvků
TOO		Tepelně ovlivněná oblast
TCD		Theory of Critical Distance
K_{max}	$[\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}]$	Maximální faktor intenzity napětí při únavovém zatížení
σ_{max}	$[\text{MPa}]$	Maximální napětí při únavovém zatížení
K_{min}	$[\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}]$	Minimální faktor intenzity napětí při únavovém zatížení
σ_{min}	$[\text{MPa}]$	Minimální napětí při únavovém zatížení
ΔK	$[\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}]$	Rozsah faktoru intenzity napětí při únavovém zatížení
$\Delta\sigma$	$[\text{MPa}]$	Rozsah napětí při únavovém zatížení